

ANÁLISE DE PAREDES DE TABIQUE E DE MEDIDAS DE REFORÇO ESTRUTURAL; ESTUDO NUMÉRICO

ANDRÉ MANUEL CHÉU PIRES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor João Paulo Sousa Costa de Miranda
Guedes

Coorientador: Engenheiro Tiago Ilharco de Moura Pinho Dias

JUNHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e Irmão

*A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a
imaginação abrange o mundo inteiro*

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Sousa Costa de Miranda Guedes, que foi absolutamente incansável durante todo o meu trabalho. Acredito firmemente que sem a sua orientação, dedicação e inesgotável dinâmica não teria sido possível concluir esta tarefa da mesma forma.

Ao meu coorientador, Engenheiro Tiago Ilharco de Moura Pinho Dias pela disponibilidade e ajuda prestadas.

Ao arquiteto Joaquim Teixeira, pela informação transmitida e ao Engenheiro Rui Cardoso, pela troca de conhecimentos.

Ao professor Doutor Tiago Pinto, pelo apoio, troca de ideias e experiência transmitida.

Aos meus amigos e colegas que me acompanharam nesta caminhada. Neste contexto, uma palavra especial para o João Santos e Paulo Bernardo.

À minha família.

Um agradecimento muito especial à Maria.

Aos meus pais e ao meu irmão, a quem devo tudo o que sou.

RESUMO

A cidade do Porto, em particular a zona do grande centro apresenta uma vasta herança de construções utilizando elementos em tabique. Distribuída por diversos locais de Portugal e do mundo, esta técnica utiliza materiais naturais na sua construção, tais como a terra e a madeira, e não requer mão-de-obra particularmente especializada. A principal motivação para o estudo efetuado neste trabalho está na falta de conhecimento sobre o comportamento das paredes de tabique e que resulta, na grande maioria dos casos, em acções de intervenção que consideram a substituição integral destas paredes por novos elementos. O principal objetivo deste trabalho consiste, por isso, em estudar este tipo de paredes, analisar o seu comportamento de modo a promover a sua reabilitação.

Na procura deste objetivo, o trabalho começa pela caracterização das paredes de tabique integradas nas construções antigas típicas da cidade do Porto. Depois de identificadas e caracterizadas, é efetuada a análise do comportamento estrutural de um conjunto de paredes de tabique selecionadas, estimando a sua carga crítica (de encurvadura) para esforços verticais, quer no estado “original”, quer “danificadas”, ou reforçadas segundo diferentes cenários de reforço propostos. Esta análise é efetuada através da utilização de ferramentas de cálculo numéricas.

Finalmente, e em relação ao mesmo conjunto de paredes de tabique, é ainda estimada a rigidez horizontal das paredes no seu plano, avaliando a sua capacidade para funcionarem como elementos de contraventamento das construções.

PALAVRAS-CHAVE: Reabilitação, Construção de tabique, Encurvadura, Simulação numérica.

ABSTRACT

The city of Porto, in particular the city centre, has a vast heritage of buildings using "tabique" elements. This technique is not restricted to this city, but can also be found in other places in Portugal and in the world. It is known for its usage of natural materials such as, wood and earth, and its simplicity makes skilled labour not particularly necessary. The motivation for this study is the lack of knowledge on the behaviour of "tabique" walls, which, in most cases, results in interventions that consider the full substitution of these walls by new elements. Therefore, the main aim of this work is to study this type of walls and to analyse its behaviour in order to promote its rehabilitation.

To reach this goal the study starts by the characterization of the "tabique" walls integrated in the typical old constructions of Porto city centre. After being identified and characterized, it is analysed the structural behaviour of a set of selected "tabique" walls, evaluating their critical force (buckling) to vertical forces, either in their "original" state, or damaged, or even reinforced according to different reinforcement proposed scenarios. This analysis is made using numerical tools.

Finally, and regarding the same set of "tabique" walls, it is still estimated the horizontal in-plane stiffness of the walls, evaluating their capacity to work as bracing elements of the constructions.

KEYWORDS: Rehabilitation, "Tabique" technique, Buckling, Numerical simulation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS, ÂMBITO E JUSTIFICAÇÃO	1
1.2. BASES DO TRABALHO	2
1.3. METODOLOGIA	2
1.4. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2. CARATERIZAÇÃO HISTÓRICA, MATERIAL E CONSTRUTIVA DO TABIQUE	5
2.1. OBJETIVOS	5
2.2. INTRODUÇÃO	5
2.3. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	7
2.3.1. HISTÓRIA DA UTILIZAÇÃO DO TABIQUE	7
2.3.2. A CASA BURGUESA DO PORTO	7
2.3.2.1. Tipo de utilização	7
2.4. PAREDES DE TABIQUE DA CASA BURGUESA DO PORTO	8
2.4.1. MADEIRA ENQUANTO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	8
2.4.2. FUNÇÃO DOS ELEMENTOS DE TABIQUE	8
2.4.3. PAREDES INTERIORES E EXTERIORES	8
2.5. CARACTERIZAÇÃO E TIPIFICAÇÃO DAS PAREDES INTERIORES DE TABIQUE	9
2.5.1. INTRODUÇÃO	9
2.5.2. MATERIAIS	9
2.5.3. TIPOLOGIAS	9
2.5.4. DIMENSÕES DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES	13
3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE PAREDES DE TABIQUE	15
3.1. OBJETIVOS	15
3.2. INTRODUÇÃO	15

3.3. PRINCÍPIOS GERAIS	16
3.3.1. INSTABILIDADE	16
3.3.2. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO USADO	18
3.4. APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS	19
3.4.1. TIPOLOGIAS ESTUDADAS	19
3.4.2. MODELOS DEFINIDOS	19
3.5. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE PAREDES DE TABIQUE.....	23
3.5.1. INTRODUÇÃO	23
3.5.2. ESTUDO DE UMA TÁBUA DE MADEIRA	23
3.5.2.1. Descrição do modelo de cálculo	23
3.5.2.2. Validação do modelo no programa SAP2000	25
3.5.3. MODELO FÍSICO BASE	26
3.5.3.1. Modelos numéricos	27
 4. ANÁLISE À ENCURVADURA	 33
4.1. OBJETIVOS	33
4.2. PRESSUPOSTOS DE CÁLCULO	33
4.3. MODELOS BASE	33
4.4. MODELOS BASE COM ANOMALIAS	36
4.5. INTERVENÇÕES IMPOSTAS SOBRE OS MODELOS	38
4.5.1. CONDIÇÕES FRONTEIRA	38
4.5.2. RESULTADOS.....	42
4.6. ANÁLISE COMPARATIVA	52
 5. REFORÇO	 53
5.1. OBJETIVOS	53
5.2. AÇÕES DE REFORÇO	53
5.2.1. REFORÇO EM AÇO.....	53
5.2.1.1. Resultados	54
5.2.2. REFORÇO EM MADEIRA	63
5.2.2.1. Resultados	63
5.3. ANÁLISE COMPARATIVA	70

6. COMPORTAMENTO DAS PAREDES DE TABIQUE A AÇÕES HORIZONTAIS	73
6.1. OBJETIVOS	73
6.2. INTRODUÇÃO	73
6.3. CONDIÇÕES FRONTEIRA	73
6.4. MODELOS E RESULTADOS	74
6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Estrutura do tabique [1]	5
Fig.2.2 – Parede de tabique (construção de madeira e construção de terra, respectivamente); (fotografia gentilmente cedida pelo arquiteto Joaquim Teixeira)	6
Fig.2.3 – Parede de tabique interior sem o revestimento (fotografia gentilmente cedida pelo arquiteto Joaquim Teixeira)	10
Fig.2.4. – Parede de tabique interior com o revestimento (fotografia gentilmente cedida)	10
Fig.2.5. – Parede de tabique interior com duplo tabuado [2]	11
Fig.2.6. – Parede de tabique interior com duplo tabuado [2]	11
Fig.2.7. – Parede de tabique interior com duplo tabuado sem revestimento (esquerda) e com revestimento (direita); (fotografia gentilmente cedida pelo arquiteto Joaquim Teixeira)	12
Fig.2.8. – Parede de tabique interior com duplo tabuado (fotografia gentilmente cedida)	12
Fig.2.9. – Tábuas e ripas – Parede de tábuas simples	13
Fig.2.10. – Tábuas e ripas – Parede de tábuas duplas	13
Fig.3.1. – Massas esféricas em equilíbrio estático [14]	16
Fig.3.2. – O problema de Euler [3]	17
Fig.3.3. – Modos de encurvadura [18]: a) $n=1$, b) $n=2$ e c) $n=3$	18
Fig.3.4. – Modelo S	20
Fig.3.5. – Fasquio excêntrico	20
Fig.3.6. – Fasquio centrado	21
Fig.3.7. – Modelo SA	21
Fig.3.8. – Modelo SP	22
Fig.3.9. – Modelo D	23
Fig.3.10. – Modelo de cálculo estrutural de uma tábua vertical isolada	24
Fig.3.11. – 1º modo de encurvadura do modelo estrutural	25
Fig.3.12. – 2º e 3º modo de encurvadura do modelo estrutural	26
Fig.3.13. – (a) Modelo S; (b) Modelo SA; (c) Modelo SP; (d) Modelo D	31
Fig.4.1. – Modelo S-base	34
Fig.4.2. – Modelo SA-base	34
Fig.4.3. – Modelo SP-base	35
Fig.4.4. – Modelo D-base	36
Fig.4.5. – Cantoneiras de ligação viga-viga (esquerda) e viga-pilar (direita)	39
Fig.4.6. – Junção com angular individual ou dois angulares colocados simetricamente	39

Fig.4.7. – Cantoneira escolhida.....	39
Fig.4.8. – Movimento realizado pela cantoneira	40
Fig.4.9. – Modelo da cantoneira no programa de cálculo Ftool.....	40
Fig.4.10. – Modelo S-1	43
Fig.4.11. – Modelo S-2	43
Fig.4.12. – Modelo S-3	44
Fig.4.13. – Modelo S-4	44
Fig.4.14. – Modelo S-5	45
Fig.4.15. – Modelo SP-1.....	46
Fig.4.16. – Modelo SP-2 (1º modo de encurvadura).....	47
Fig.4.17. – Modelo SP-2 (2º modo de encurvadura).....	47
Fig.4.18. – Modelo SP-3.....	48
Fig.4.19. – Modelo SP-4.....	48
Fig.4.20. – Modelo SP-5.....	49
Fig.4.21. – Modelo D-1	49
Fig.4.22. – Modelo D-2.....	50
Fig.4.23. – Modelo D-3.....	50
Fig.4.24. – Modelo D-4.....	51
Fig.4.25. – Modelo D-5.....	51
Fig.5.1. – Modelos S-RA e S-RAV	55
Fig.5.2. – Modelos S-3-RA e S-3-RAV.....	56
Fig.5.3. – Modelos S-4-RA e S-4-RAV.....	56
Fig.5.4. – Modelo S-5-RA e S-5-RAV	57
Fig.5.5. – Modelo SP-RA.....	57
Fig.5.6. – Modelo SP-3-RA	58
Fig.5.7. – Modelo SP-4-RA	58
Fig.5.8. – Modelo SP-5-RA	59
Fig.5.9. – Modelo D-RAV – modo local.....	60
Fig.5.10. – Modelos D-RA e D-RAV (modo 2)	60
Fig.5.11. – Modelos D-3-RA (modo 2) e D-3-RAV (modo 2)	61
Fig.5.12. – Modelos D-4-RA e D-4-RAV (modo 2).....	61
Fig.5.13. – Modelos D-5-RA e D-5-RAV (modo 2).....	62
Fig.5.14. – Modelos S-RM e S-RMV	64

Fig.5.15. – Modelos S-3-RM e S-3-RMV	64
Fig.5.16. – Modelos S-4-RM e S-4-RMV	65
Fig.5.17. – Modelos S-5-RM e S-5-RMV	65
Fig.5.18. – Modelo SP-RM (modo 2).....	66
Fig.5.19. – Modelo SP-3-RM (modo 2)	67
Fig.5.20. – Modelos SP-4-RM e SP-5-RM	67
Fig.5.21. – Modelos D-RM e D-RMV(modo 2)	68
Fig.5.22. – Modelos D-3-RM e D-3-RMV	69
Fig.5.23. – Modelos D-4-RM (modo 2) e D-4-RMV (modo 2)	69
Fig.5.24. – Modelos D-5-RM e D-5-RMV	70
Fig.6.1. – Modelo S-base	75
Fig.6.2. – Modelos S-1 e S-2.....	75
Fig.6.3. – Modelos S-2-RA e S-2-RAV	76
Fig.6.4. – Modelos S-2-RM e S-2-RMV	76
Fig.6.5. – Fasquio excêntrico	77
Fig.6.6. – Fasquio centrado.....	78
Fig.6.7. – Modelo SA-base	78
Fig.6.8. – Modelos SA-1 e SA-2.....	78
Fig.6.9. – Modelo SP-base.....	79
Fig.6.10. – Modelo SP-1 e SP-2.....	79
Fig.6.11. – Modelos SP-2-RA e SP-2-RM.....	80
Fig.6.12. – Modelo D-base	80
Fig.6.13. – Modelos D-1 e D-2	81
Fig.6.14. – Modelos D-2-RA e D-2-RAV	81
Fig.6.15. – Modelos D-2-RM e D-2-RMV	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. – Propriedades mecânicas e físicas da classe de resistência C18 da madeira de pinho nacional...	24
Tabela 3.2. – Propriedades geométricas da seção transversal ta tábuas de madeira.....	24
Tabela 3.3. – Validação dos resultados obtidos através do programa SAP2000	25
Tabela 3.4. – Propriedades materiais do aço dos pregos	27
Tabela 3.5. – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal das tábuas de madeira verticais ..	28
Tabela 3.6. – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal das ripas	28
Tabela 3.7. – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal dos pregos	28
Tabela 3.8. – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal do frechal superior e inferior	28
Tabela 3.9. – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal das ripas	29
Tabela 3.10. – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal dos prumos	29
Tabela 3.11. – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal da tábuas de madeira vertical	30
Tabela 3.12. – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal da tábuas de madeira diagonal ...	30
Tabela 4.1. – Modelos analisados.....	37
Tabela 4.2. – Carga crítica de encurvadura-modelo S.....	37
Tabela 4.3. – Carga crítica de encurvadura-modelo SA.....	37
Tabela 4.4. – Carga crítica de encurvadura-modelo SP.....	38
Tabela 4.5. – Carga crítica de encurvadura-modelo D.....	38
Tabela 4.6. – Condições de fronteira respeitantes aos frechais inferior e superior	42
Tabela 4.7. – Condições de fronteira respeitantes aos topos esquerdo e direito	42
Tabela 4.8. – Modelos analisados.....	42
Tabela 4.9. – Carga crítica de encurvadura-Modelo SA.....	45
Tabela 4.10. – Carga crítica de encurvadura-Modelo S, SA, SP e D	52
Tabela 5.1. – Dimensões e módulos de elasticidade da fita de reforço	54
Tabela 5.2. – Propriedades geométricas do sistema de reforço com fitas de aço.....	54
Tabela 5.3. – Modelos analisados.....	55
Tabela 5.4. – Propriedades geométricas do sistema de reforço numa das faces da parede.....	63
Tabela 5.5. – Modelos analisados.....	63
Tabela 5.6. – Carga crítica de encurvadura - Paredes reforçadas com aço (RA e RAV)	70
Tabela 5.7. – Carga crítica de encurvadura - Paredes reforçadas com madeira (RM e RMV)	70
Tabela 5.8. – Incremento percentual da carga crítica em relação ao modelo base e entre soluções de reforço (RA-RAV e RM e RMV) - Modelo S	71
Tabela 5.9. – Incremento percentual da carga crítica em relação ao modelo base - Modelo SP	71

Tabela 5.10. – Incremento percentual da carga crítica em relação ao modelo base e entre soluções de reforço (RA-RAV e RM e RMV) - Modelo D	72
Tabela 6.1. – Condições de fronteira respeitantes ao frechal superior e inferior da parede	73
Tabela 6.2. – Condições de fronteira respeitantes ao topo esquerdo e direito da parede.....	74
Tabela 6.3. – Modelos analisados-condições de fronteira.....	74
Tabela 6.4. – Modelos analisados-reforço em aço e madeira	74
Tabela 6.5. – Rigidez horizontal-Modelo S.....	76
Tabela 6.6. – Rigidez horizontal-Modelo SA.....	79
Tabela 6.7. – Rigidez horizontal - Modelo SP	80
Tabela 6.8. – Rigidez horizontal-Modelo D.....	82

1

INTRODUÇÃO

1.1. OBJETIVOS, ÂMBITO E JUSTIFICAÇÃO

Grande parte das construções antigas presentes no centro histórico do Porto, tal como noutros centros históricos de centro urbanos em Portugal, enfrenta uma realidade marcada pela degradação e abandono, associada à não existência de processos de manutenção sistemáticos. Assim, a conservação e reabilitação deste património surge como tarefa essencial para, através de medidas apropriadas, manter esta tipologia construtiva que constitui um património de grande valor histórico e riqueza cultural.

Dentro do vasto leque de elementos estruturais que constituem as construções antigas do centro histórico do Porto, este trabalho debruça-se sobre paredes de tabique. A existência de poucos estudos relativamente ao comportamento destes elementos estruturais e a possibilidade de poder contribuir para melhorar o seu desempenho através de propostas que se enquadram no tema da reabilitação, justificam a realização desta investigação. Em particular, este trabalho, de carácter puramente numérico, pretende estudar o comportamento estrutural de paredes de tabique, analisar possíveis soluções de reforço e a melhoria que introduzem no comportamento deste tipo de estruturas. As paredes de tabique que serão analisadas respondem a tipologias tipicamente encontradas em construções antigas da cidade do Porto. No entanto, estas tipologias podem também ser encontradas em construções antigas presentes noutras partes do país.

Neste contexto, o trabalho de investigação responde aos seguintes objectivos:

- Apresentar a construção de tabique na zona histórica do Porto, descrevendo o elemento de tabique e o tipo de edifício que lhe está associado;
- Apresentar as principais características de algumas tipologias de paredes de tabique existentes na zona histórica do Porto;
- Simular numericamente o comportamento estrutural de paredes de tabique a acções verticais, analisando o fenómeno de instabilidade;
- Propor medidas de reforço que melhorem o comportamento das paredes em causa;
- Avaliar a rigidez horizontal no plano deste tipo de paredes;
- Estimular a preservação da construção de tabique.

1.2. BASES DO TRABALHO

O trabalho desenvolvido teve por base diversos tipos de documentos tais como livros, dissertações de mestrado e doutoramento bem como outro tipo de bibliografia de referência na área, nomeadamente artigos publicados em conferências.

A caracterização sumária da casa típica que é alvo de estudo neste trabalho baseia-se fundamentalmente em textos do livro “Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos”[10]. Para percepção inicial e descrição das paredes de tabique contribui também a tese de doutoramento de Rui Cardoso [3] e três teses de mestrado da UTAD, dos alunos José Manuel Gonçalves Martinho [6], Joana Maria Pereira Pinto de Carvalho [4] e Armando José Branco Cepeda [5]. Das dissertações estudadas destaca-se a de doutoramento, realizada por Rui Cardoso. Salientam-se ainda, e de modo muito particular, os trabalhos de Joaquim Teixeira [2]. Os trabalhos aqui citados referem-se quase na íntegra à caracterização física e material das paredes de tabique.

Procuraram-se outros elementos bibliográficos relacionados com o estudo de paredes de tabique, tendo-se verificado que existe pouca informação relativamente ao tema, em particular no que diz respeito ao seu comportamento mecânico. Durante a realização dos diferentes capítulos foram também consultadas algumas páginas web que retratavam temas de interesse directo ou colateral, e que esta tese inclui.

A base bibliográfica pouco abundante é o espelho da necessidade de investigação nesta área, sendo este trabalho inovador na modelação e nos resultados que apresenta. Todos os cálculos foram efectuados com o programa de cálculo SAP2000 [12].

1.3. METODOLOGIA

A metodologia associada à execução deste trabalho incluiu as seguintes tarefas:

- Revisão bibliográfica relacionada com o tema, recorrendo também a testemunhos junto de profissionais ligados à área das construções antigas;
- Modelação numérica de paredes de tabique e de possíveis soluções de reforço com recurso a um programa de cálculo automático;
- Simulação numérica do comportamento estrutural de paredes de tabique, analisando o fenómeno de instabilidade a acções verticais e a rigidez horizontal destas paredes na situação original e após a implementação de medidas de reforço.

1.4. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho encontra-se dividido em 7 capítulos. A seguir expõe-se o que é abordado em cada um deles.

Neste capítulo, capítulo 1 é feito o enquadramento do trabalho realizado, onde se faz referência aos objectivos que se pretendem atingir e aos motivos que desencadearam a problemática em questão. Fala-se também da metodologia usada para levar a cabo a execução deste trabalho e relatam-se as bases em que se apoia.

No capítulo 2 faz-se a caracterização histórica, material e construtiva do tabique. Em primeiro lugar realiza-se uma breve retrospectiva sobre a construção de tabique em Portugal, mais concretamente na zona do Porto. Segue-se depois uma breve descrição do tipo de edifício onde esta técnica construtiva normalmente se insere, analisando aspectos como o número de pisos e o tipo de utilização. Faz-se

depois referência aos tipos de paredes que usam a técnica do tabique, descrevendo, de forma mais detalhada, as paredes interiores.

O capítulo 3 trata da modelação numérica das paredes de tabique. Procura-se, numa primeira fase, descrever o fenómeno da encurvadura, já que o maior problema deste tipo de paredes é a sua instabilidade. Explicado o conceito envolvido, faz-se uma apresentação e descrição dos modelos estudados, explicando também como foram modelados no programa de cálculo estrutural. Neste contexto, aspectos técnicos referentes ao fasquio e ao modo como este se liga à estrutura de madeira foram investigados e contemplados nos modelos numéricos sugeridos. Avaliam-se também os resultados obtidos para uma barra isolada de modo a poder validar os resultados numéricos, antes de prosseguir com o estudo dos modelos.

No capítulo 4 simula-se o comportamento estrutural de paredes de tabique, analisando-se os fenómenos de instabilidade associados às ações verticais. Esta análise é efetuada para paredes sujeitas a anomalias e afectadas de diferentes condições fronteira, recorrendo ao programa de cálculo escolhido.

No capítulo 5 realiza-se o mesmo tipo de análise referida no capítulo anterior, agora para as paredes de tabique reforçadas. São apresentadas as soluções ensaiadas e comparados os resultados usando dois materiais de reforço: aço e madeira.

No capítulo 6 é avaliada a rigidez horizontal no plano das paredes de tabique estudadas nos capítulos 4 e 5.

Por último, no capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões obtidas no decurso do trabalho realizado.

2

CARATERIZAÇÃO HISTÓRICA, MATERIAL E CONSTRUTIVA DO TABIQUE

2.1. OBJETIVOS

Os objectivos deste capítulo são:

- Realizar uma retrospectiva da construção de tabique em Portugal, mais concretamente na zona do Porto;
- Identificar o tabique, como técnica de construção, e realizar uma primeira descrição do elemento de tabique e do tipo de edifício que caracteriza a zona em análise (zona histórica da cidade do Porto);
- Justificar o estudo das construções de tabique existentes no centro do Porto;
- Identificar as principais características do elemento construtivo de tabique e do tipo de paredes existentes na casa Burguesa do Porto.

2.2. INTRODUÇÃO

Este capítulo inicia-se com a descrição no tempo e no espaço da construção em tabique. Esta técnica é utilizada principalmente na construção de paredes, formadas por elementos de madeira colocados na posição vertical, horizontal ou inclinada, sendo os espaços vazios entre elas preenchidos com terra ou outro material, como ilustrado na figura 2.1.

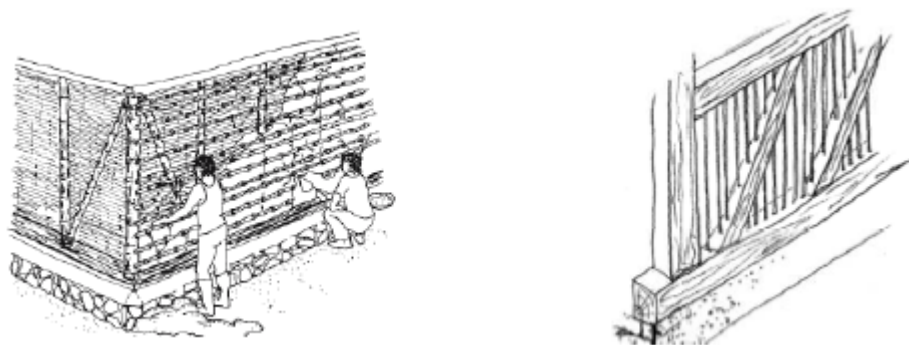


Fig.2.1 – Estrutura do tabique [1]

Em seguida aborda-se a história da sua utilização em geral e, mais concretamente, na casa Burguesa do Porto. Esta técnica insere-se na construção tradicional desta região, representando um símbolo das construções antigas.

Segue-se a caracterização e tipificação das paredes inseridas neste tipo de construção, complementada por esquemas representativos.

De referir que as paredes analisadas neste trabalho, e que se inserem na tipologia da casa do Porto incluem-se nas estruturas de madeira embora esta técnica construtiva seja frequentemente tida como uma construção de terra. A explicação para esta dualidade de critério encontra-se na diferença do processo construtivo usado para umas e outras. Na figura 2.2 são apresentadas duas paredes de tabique. A da esquerda, presente numa casa típica do Porto, insere-se nas construções em madeira; a da direita está associada aos tipos de construção em terra.



Fig.2.2 – Paredes de tabique (construção de madeira e construção de terra, respectivamente); (fotografia gentilmente cedida pelo arquiteto Joaquim Teixeira)

Para o primeiro tipo de parede as tábuas apresentam-se muito pouco espaçadas; a estrutura principal é composta por madeira, sendo a parede revestida com um reboco de argamassa à base de cal. No caso da parede da direita, o espaçamento entre tábuas é muito maior e preenchido por terra, antes de ser revestida usando um reboco de características idênticas ao do tabique anterior.

De referir também que nos últimos anos tem vindo a ser desenvolvido trabalho de investigação na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), com o propósito de examinar a construção de tabique na região Norte de Portugal. Este estudo baseia-se sobretudo numa recolha de informação detalhada acerca deste tipo de construção para poder criar um suporte, sobretudo no que toca às características gerais dos edifícios, aos materiais aplicados, às soluções construtivas e às anomalias encontradas. A par dessa recolha de informação, é feito também um estudo experimental de identificação e caracterização dos materiais utilizados nas construções de tabique.

A caracterização apresentada neste trabalho restringe-se ao sistema construtivo do tabique de madeira existente na arquitectura tradicional do Norte de Portugal, mais especificamente da zona histórica da cidade do Porto em construção corrente. Os dados que estão na base da informação reunida provêm de fontes bibliográficas específicas da construção tradicional.

2.3. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

2.3.1. HISTÓRIA DA UTILIZAÇÃO DO TABIQUE

O tabique das casas do Porto tem as suas origens entre o século XVII e o início do século XIX [2]. A forma de construir usada até então revela um aperfeiçoamento de formas de construir que subsistiram durante vários séculos valendo-se de um leque variado de materiais, de entre os quais se destaca a madeira [2].

Ao nível de todo o território Português, verifica-se que na Beira Alta e Beira Baixa, no Ribatejo e Alentejo existem muitos exemplos de construções que incluem elementos de tabique [3]. Ainda assim, é no Norte de Portugal, em especial na região Nordeste de Trás-os-Montes e Alto Douro, que se encontra a mais preciosa herança de construções de tabique, como mostram os trabalhos de [4], [5] e [6]. Este tipo de construção apresenta-se mais marcado nas regiões referidas pelo fato de serem zonas interiores, apresentando reduzida humidade relativa e precipitação, condições favoráveis para este tipo de construção [7]. Verifica-se também que o uso da madeira neste tipo de construção está relacionado com questões económicas, e que resultam, em particular, da não necessidade de transporte destes materiais, já que existem na região [7]. A partir do século XX, altura da generalização do uso do betão, esta técnica construtiva deixou de ser utilizada [8].

2.3.2. A CASA BURGUESA DO PORTO

Ao contrário do que aconteceu em Lisboa na reconstrução da baixa após o terramoto, que deu origem a um novo sistema construtivo das habitações, a cidade do Porto manteve um esquema tradicional de construção, não ocorrendo nenhuma quebra significativa que pusesse fim à tradição construtiva nesta cidade [2]. Assim, a casa Burguesa transporta um espírito de intemporalidade, permanência e uma universalidade dos materiais e das técnicas de construção do passado [2].

Este tipo de construção é detentor de grande regularidade, pelo facto de existir uma grande sistematização e standardização dos elementos construtivos, e o seu estilo próprio faz com que seja uma marca da cidade, traduzindo um pouco da história e das condições do passado [2]. Esta classe de habitação, em solução vertical caracteriza-se por ser esguia, estreita e alta e tem um número variável de andares (vulgarmente 3 ou 4, embora se encontrem construções mais altas). A casa típica Burguesa começa por se apresentar em lotes de forma irregular e de uma só frente, correspondentes ao século XVII [2], e a maior parte tem as suas frontarias simplesmente de tabique e madeira. Todavia, surgem ainda neste período lotes regulares, de duas frentes. Caracterizavam-se por um piso de rés-do-chão amplo que era utilizado como local de trabalho e os restantes pisos eram utilizados como habitação. À excepção do rés-do-chão, que é construído em pedra, todos os outros pisos são construídos em tabique [2]. Esta casa caracteriza a casa popular e burguesa e é pensada de maneira a ser funcional, sendo utilizada como residência urbana e estabelecimento comercial em simultâneo.

2.3.2.1 Tipo de utilização

A utilização do tabique como elemento de construção pode apresentar diversos fins. Francisco Barata propõe uma classificação que define três tipos de habitação burguesa: a do Porto mercantilista, a do Porto iluminista e a do Porto liberal [9].

Na área da Ribeira-Barredo, na baixa de Miragaia e nos quarteirões compactos da Sé e da Vitória pode-se encontrar o primeiro tipo referido acima. O segundo tipo localiza-se nas áreas de expansão Almadina (Rua do Almada, Rua de Cedofeita e Rua de Santa Catarina), sendo que para o terceiro tipo

tem-se como exemplo a Rua da Boavista, a Rua Álvares Cabral, a Rua da Constituição, a Rua de Costa Cabral e a Rua de D. João IV [2].

A típica casa Burguesa é detentora de um carácter multifuncional, servindo de habitação e local de trabalho. A oficina, armazém, comércio ou arrumos situam-se no rés-do-chão e a habitação nos restantes pisos que seguem uma tradição de não especialização na divisão dos seus espaços [2].

Mais tarde, além dos edifícios que mantêm a tipologia tradicional polifuncional, surgem os edifícios de habitação monofuncional, ou seja, só de habitação.

2.4. PAREDES DE TABIQUE DA CASA BURGUESA DO PORTO

2.4.1. MADEIRA ENQUANTO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

Sendo ocasionalmente importadas, as madeiras usadas na construção da casa burguesa do Porto eram provenientes de locais à volta da cidade [2]. Embora o pinho nacional seja a espécie de madeira tipicamente usada na estrutura destes tabiques, também era utilizado o castanho e o carvalho, em particular em casas mais nobres [2]. Tendo em conta que a madeira na época em questão era um material que abundava em todo o país, a sua utilização como material construtivo era evidente. A acrescentar a isto, a madeira apresenta uma série de características e qualidades que a tornam um material bastante apelativo para a actividade da construção, destacando-se, entre elas, a capacidade para funcionar à tração e ser fácil de transportar e de trabalhar.

2.4.2. FUNÇÃO DOS ELEMENTOS DE TABIQUE

O tabique, sendo uma técnica construtiva que não necessita de mão-de-obra especializada e que utiliza materiais naturais, mostra uma grande versatilidade; é usada em vários estilos de habitação e na construção de elementos verticais com diferentes funções: paredes exteriores, paredes divisórias, paredes de caixa de escadas e mesmo na definição do contorno de chaminés.

Na casa típica do Porto os tabiques estão presentes em todas as formas referidas, sendo claramente as paredes interiores os elementos construtivos de tabique predominantes e existentes na maioria das construções antigas. Estas paredes são normalmente consideradas não estruturais, sendo utilizadas apenas como elementos de compartimentação, embora possam também contribuir para o contraventamento global do edifício pelo fato de se encontrarem ligadas a outros elementos construtivos [3]. Relativamente às paredes de tabique exteriores, têm como função fechar o edifício, sendo que neste caso assumem também uma função estrutural. Estas paredes suportam acções verticais transmitidas por outros elementos, nomeadamente pela cobertura, e acções horizontais, designadamente a ação do vento [3].

2.4.3. PAREDES INTERIORES E EXTERIORES

Na cidade do Porto, e nos edifícios antigos em análise, existem, normalmente, dois tipos de paredes em tabique: as paredes de tabique simples e as paredes de tabique duplo. Estes dois tipos de paredes são bastante análogos construtivamente, variando no número de elementos estruturais associados e na sua forma. Ainda mais antigo, existe o chamado tabique misto ou sistema fachwerk [10], constituído por prumos, travessanhos, frechais e escoras (normalmente em forma de cruz de Santo André), preenchidas com pedra miúda, tijolos maciços, ou outros materiais naturais, assumindo em Portugal a designação de frontais. A designação de misto justifica-se pelo facto de estas paredes usarem sempre

dois materiais: a madeira que servia de esqueleto e um outro material que era usado para o preenchimento [10].

As paredes de tabique simples e de tabique duplo são constituídas por um tabuado simples ou duplo, respectivamente, apresentando menor percentagem de material de enchimento, e de menor densidade, em relação às paredes de tabique misto [10]. Estas paredes são formadas por uma estrutura delimitada por barrotes verticais de secção quadrangular, com cerca de 7 cm de largura, designados por prumos, normalmente apoiados e (ou) ligados a um frechal inferior e superior. Esta esquadria é preenchida pelo tabuado (simples ou duplo) sobre o qual é pregado um fasquiado que recebe o reboco de revestimento.

A execução destas paredes surge numa fase em que a habitação já está assoalhada, ou seja na fase de acabamentos [10]. A seção seguinte refere-se a este tipo de paredes, procedendo-se à sua descrição, caracterização e exposição das diferentes tipologias existentes e que foram alvo de estudo neste trabalho.

2.5. CARACTERIZAÇÃO E TIPIIFICAÇÃO DAS PAREDES DE TABIQUE

2.5.1. INTRODUÇÃO

Nesta seção descrevem-se as paredes de tabique tipicamente existentes nos edifícios antigos do Porto, apresentando as tipologias encontradas. São descritas as diversas soluções construtivas que caracterizam estas paredes, analisando-se algumas variantes na forma de as construir.

2.5.2 MATERIAIS

Na construção de elementos de tabique os materiais usados são a madeira maciça, a terra e (ou) a argamassa à base de cal, que servem como material de enchimento e (ou) revestimento das paredes de tabique. De acordo com a informação prestada pelo arquiteto Joaquim Teixeira, as espécies de madeira que normalmente se encontram são o pinho (*Pinus Pinaster*) e o castanho (*Castanea Sativa* Mill.), sendo o pinho o tipo de madeira mais correntemente usado.

2.5.3. TIPOLOGIAS

As paredes interiores de tabique das casas do Porto são, de uma forma geral, paredes de tábuas simples, com variações na sua forma de construção.

As paredes mais antigas dizem respeito ao século XVII e são constituídas por uma estrutura de barrotes com 7 a 8 cm de lado, colocados em forma de frechais, prumos e vergas, constituindo um, ou mais quadros que são preenchidos com tábuas com largura variável, usualmente com uma média de 15 cm e espessura entre os 4 a 5 cm, com uma folga de cerca de 2 cm entre elas. As tábuas são colocadas na vertical e pregadas aos frechais (superior e inferior), quando existem. De um lado e do outro do tabuado é pregado um fasquiado para receber os revestimentos de argamassa [10]. Nas figuras 2.3 e 2.4 podem ver-se paredes deste tipo, sem e com revestimento, respectivamente.



Fig.2.3 – Parede de tabique interior sem o revestimento (fotografia gentilmente cedida pelo arquiteto Joaquim Teixeira)



Fig.2.4 – Parede de tabique interior com o revestimento (fotografia gentilmente cedida pela arquiteta Vanessa Sampaio).

As paredes mais recentes, pertencentes ao final do século XVIII e a todo o século XIX, e designadas por paredes de tábuas duplas, adotam a mesma estrutura de barrotes, sendo os quadros que formam agora preenchidos por um duplo tabuado, constituindo uma variação em termos construtivos [10]. De acordo com a informação a que se teve acesso, a estrutura dos barrotes pode ser realizada de duas formas. Na primeira, os prumos são colocados ao longo de toda a parede, afastados de 1 metro. Estes são pregados ao frechais superior e inferior que se apoiam, ou ligam ao vigamento dos pavimentos. Na segunda forma de execução, a estrutura da parede tem prumos a toda a altura apenas junto das paredes

de meiação. Pode ainda existir um frechal superior e um frechal inferior, este último por vezes colocado à altura do rodapé e apoiado em pequenos prumos assentes no soalho. Estas paredes são preenchidas por um duplo tabuado com tábuas dispostas na vertical e na diagonal e com uma média de 2cm de espessura cada uma. Sobre estas tábuas, dos dois lados é pregado um ripado que recebe as argamassas de reboco e acabamento [10]. Estas paredes são revestidas da mesma forma que o resto das paredes da habitação, assegurando a continuidade dos acabamentos e revestimentos dos espaços interiores [10]. Na figura 2.5 e 2.6 apresentam-se esquemas de paredes deste tipo.

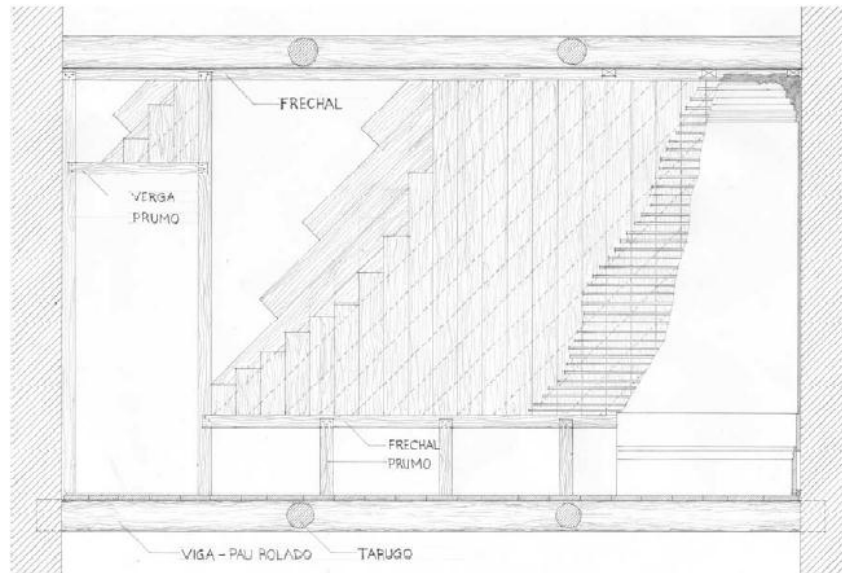


Fig.2.5 – Parede de tabique interior com duplo tabuado com prumos apenas junto das paredes de meiação [2]

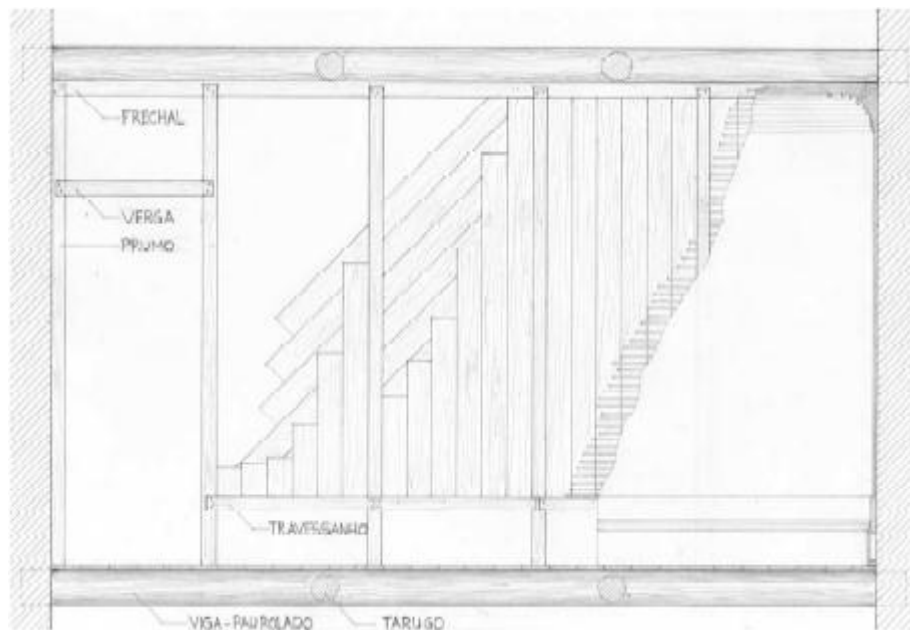


Fig.2.6 – Parede de tabique interior com duplo tabuado com prumos colocados ao longo de toda a parede [2]

Resumindo, verifica-se que um elemento construtivo de tabique simples, em particular no que diz respeito às paredes divisórias interiores, é constituído por uma estrutura de madeira formada por prumos, frechais e vergas, criando espaços preenchidos por tábuas verticais ligadas entre si através de ripas de madeira horizontais. Dentro desta técnica construtiva encontram-se variações no método

construtivo do tabique, existindo uma disposição que apresenta um tabuado duplo: um primeiro pano normalmente com tábuas alinhadas na vertical e um segundo com tábuas dispostas na diagonal [11]. Este tabuado diagonal é distribuído a começar no centro, ou a partir dos cantos, podendo apresentar variações na sua disposição. Na figura 2.7 é apresentada uma parede deste tipo.



Fig.2.7 – Parede de tabique interior com duplo tabuado sem revestimento (esquerda) e com revestimento (direita) (fotografia gentilmente cedida pelo arquiteto Joaquim Teixeira)

Na figura 2.8 apresenta-se uma parede dupla degradada onde são visíveis os dois panos de tábuas, vertical e diagonal.



Fig.2.8 – Parede de tabique interior com duplo tabuado (fotografia gentilmente cedida pela arquiteta Vanessa Sampaio)

2.5.4. DIMENSÕES DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES

Verifica-se, de acordo com a informação obtida, que as paredes de tabique interiores não terão dimensões standardizadas, já que os valores para o comprimento, largura e espessura, de toda a parede, ou das tábuas que a constituem apresentam uma grande variabilidade de edifício para edifício.

A largura das tábuas é a grandeza da parede que mais varia, constatando-se que a largura média da tábua vertical é de $L=15$ cm e a sua espessura ' e ' varia entre os 3 e os 5 cm com uma média que ronda os 4 cm para as paredes de tábuas simples. A folga entre tábuas verticais também não é constante assumindo um valor médio de $f=2$ cm. Para as paredes de tábuas duplas a largura média das tábuas verticais mantém-se sendo que as tábuas diagonais são ligeiramente mais largas, entre 15 a 20 cm. A espessura de cada uma destas tábuas ' e_1 ' e ' e_2 ' é normalmente menor, com uma média de 2 cm para cada uma delas. Relativamente aos frechais e aos prumos, estes apresentam uma geometria normalmente quadrangular (7 e 8 cm). Para o fasquio, com formato trapezoidal, em termos médios tem-se que a face maior do trapézio apresenta um valor de $A=2,5$ cm, a face menor um valor de $B=2,0$ cm, a espessura um valor de $C=1,5$ cm, sendo a folga entre elas, ' D ', de 3 a 4 cm. Na figura 2.9 e 2.10 são apresentados esquemas explicativos da estrutura de madeira típica de paredes de tabique de tábuas simples e duplas respetivamente. Estes valores para os diferentes elementos que constituem o sistema estrutural da parede de tabique foram apurados junto do arquitecto Joaquim Teixeira.

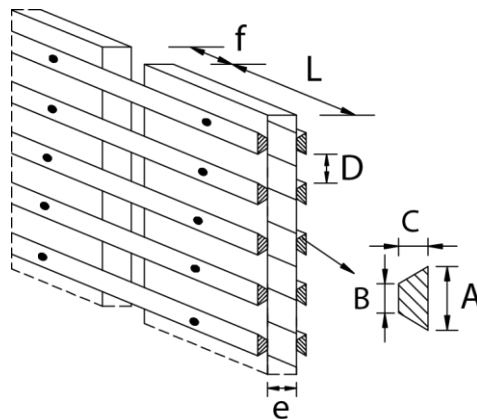


Fig.2.9 – Tábuas e ripas – Parede de tábuas simples

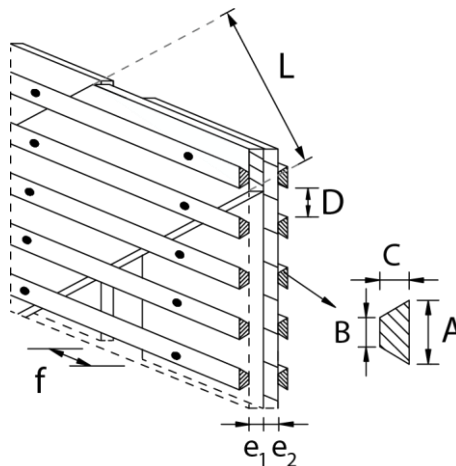


Fig.2.10 – Tábuas e ripas – Parede de tábuas duplas

3

MODELAÇÃO NUMÉRICA DE PAREDES DE TABIQUE

3.1. OBJETIVOS

Os objectivos deste capítulo são:

- Efetuar uma revisão bibliográfica sobre a instabilidade de peças de madeira;
- Desenvolver e propor modelos numéricos com capacidade para simular o comportamento estrutural de paredes de tabique e avaliar a carga vertical crítica dessas paredes;
- Comparar os resultados numéricos obtidos num elemento estrutural simples com resultados analíticos, com vista à validação dos primeiros.

3.2. INTRODUÇÃO

Com base na informação que é apresentada no Capítulo 2, neste Capítulo são estudadas duas tipologias de paredes de tabique: paredes de tabuas simples e paredes de tábuas duplas. Estas soluções são as mais adotadas na construção da casa típica do Porto, justificando a sua eleição.

Para o seu estudo foram definidos quatro modelos numéricos que assumiram a designação de S, SA, SP e D e que representam paredes de tábuas simples, paredes de tábuas simples com abertura e paredes de tábuas duplas.

Neste trabalho é analisada a resposta das paredes à encurvadura vertical e a ações horizontais atuantes no topo no plano da estrutura. A primeira análise permite estimar a capacidade resistente limite destas paredes às ações verticais por condições de instabilidade, e a segunda a rigidez horizontal no plano, ou seja a capacidade das paredes para funcionarem como elementos de contraventamento no seu plano. Este segundo aspecto das paredes de tabique será analisado posteriormente no Capítulo 6.

Antes das análises de encurvadura das paredes é efetuada, no presente capítulo, uma verificação sumária do programa de cálculo que é utilizado nas análises realizadas. Esta validação consiste na avaliação numérica da capacidade resistente à compressão por encurvadura de uma tábua vertical de madeira isolada com as dimensões correntes das tábuas existentes numa parede de tabique. Os resultados numéricos são então confrontados com os resultados analíticos, através da aplicação da teoria de Euler.

Por opção, as análises que são efectuadas no âmbito deste trabalho consideraram apenas a contribuição do esqueleto de madeira das paredes, não simulando o material de enchimento nos modelos numéricos. Todos os cálculos foram realizados com recurso ao programa de cálculo SAP2000 [12].

3.3. PRINCÍPIOS GERAIS

Nesta secção começa-se por descrever o fenómeno de instabilidade de encurvadura e a teoria de Euler. Seguidamente faz-se referência ao programa de cálculo automático adoptado.

3.3.1. INSTABILIDADE

O fenómeno da encurvadura é um fenómeno que ocorre em peças esbeltas (peças onde a área da secção transversal é pequena quando comparada com o seu comprimento) submetidas a esforços de compressão axial. A encurvadura acontece quando a peça nestas condições sofre flexão transversal, ou seja instabilidade elástica. Assim, a peça pode perder a sua capacidade portante sem que o material tenha atingido a sua tensão de rotura. Este colapso ocorre na direcção perpendicular ao eixo de menor inércia da sua secção transversal [13].

A estabilidade de uma estrutura, isto é a capacidade para suportar determinado carregamento sem sofrer uma mudança abrupta da sua configuração, surge por isso como uma condição de equilíbrio que deve ser satisfeita na análise do seu comportamento. O conceito de estabilidade pode ser definido e assimilado através do problema clássico da massa esférica que repousa em superfícies curvas ou retas, como ilustra a figura 3.1.

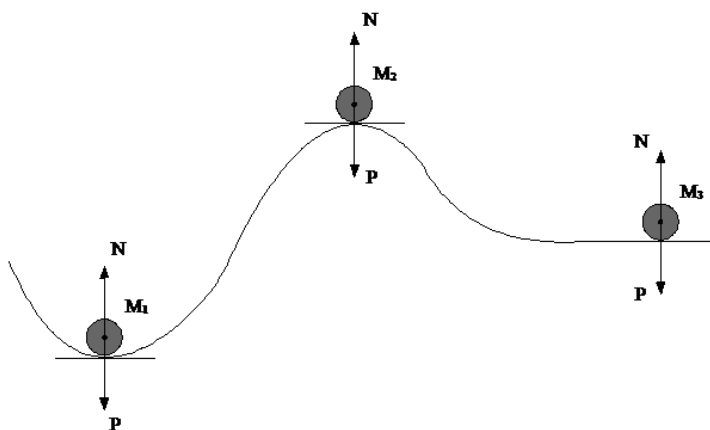


Fig.3.1 – Massas esféricas em equilíbrio estático [14]

Os pontos onde repousam as massas M_1 , M_2 e M_3 têm inclinação nula e representam pontos de equilíbrio estático. No entanto, o tipo de equilíbrio de cada um destes pontos é essencialmente diferente. Assim, se a massa M_1 sofre uma pequena perturbação externa, quando retirada a causa da perturbação a massa volta à posição inicial de equilíbrio. Diz-se neste caso que esta posição de equilíbrio é estável. No que diz respeito à massa M_2 , ao contrário do que ocorre com a massa M_1 , o seu equilíbrio é instável, visto que após uma pequena perturbação a resultante das forças que agem sobre o sistema tende a afastar a esfera da posição original de equilíbrio. No terceiro caso, quando a massa repousa sobre uma superfície plana, o equilíbrio é neutro ou indiferente, ou seja, em qualquer posição a esfera permanece em equilíbrio [14].

Posto isto, para avaliar se uma peça pode ou não instabilizar, tem que analisar-se uma estrutura comprimida que suporta uma carga P . Observa-se que, se o seu equilíbrio for perturbado instantaneamente, a estrutura voltará à posição de equilíbrio inicial desde que P não exceda um certo valor P_{cr} chamado de carga crítica. No entanto, se $P > P_{cr}$, o sistema tende a afastar-se da sua

posição original, estabilizando numa nova posição de equilíbrio. No primeiro caso diz-se que o sistema é estável, no segundo caso diz-se que é instável [15].

Os primeiros passos no estudo do conceito da instabilidade de peças lineares de comportamento isotrópico linear foram dados pelo matemático Leonhard Euler que, em meados do século XVIII, determinou analiticamente uma expressão para o cálculo da força crítica P_{cr} (ou limite) de compressão numa coluna bi-articulada, mediante a resolução da equação diferencial que contempla o modelo de *Vigas de bernoulli*¹ [16]. Para modelar matematicamente este fenómeno, este matemático descobriu que a estabilidade de colunas submetidas a esforços axiais de compressão depende da relação entre uma propriedade da seção transversal da coluna e o seu comprimento [17].

Na figura que se segue pode ver-se, à esquerda, a configuração indeformada e à direita, a configuração deformada de uma peça linear biarticulada:

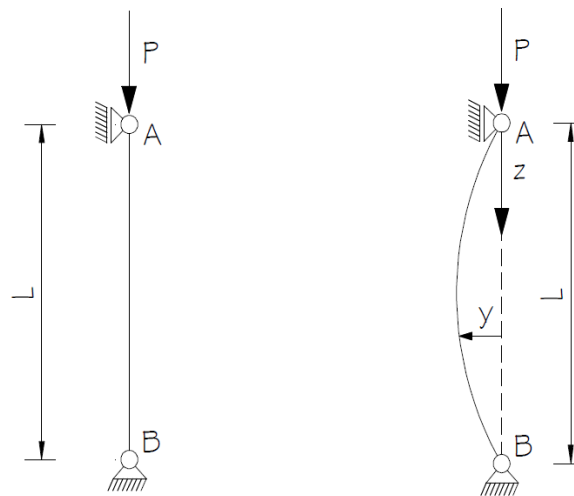


Fig.3.2 – O problema de Euler [3]

Olhando para a configuração da deformada, verifica-se que o valor do momento numa qualquer seção é

$$M = P y \quad (3.1)$$

sendo y a coordenada que define a deformação lateral da peça. A equação diferencial que governa a linha elástica é dada por

$$\frac{M}{EI} = -\frac{d^2y}{dz^2} \quad (3.2)$$

¹ Vigas onde as secções transversais permanecem planas e ortogonais ao eixo da barra antes e após a sua deformação

sendo que a resolução simultânea das expressões (3.1) e (3.2) permite obter a expressão (3.3) que define o valor das cargas de encurvadura P ,

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{l^2} \quad (3.3)$$

em que E é o módulo de elasticidade longitudinal, I é o momento de inércia da seção em relação ao eixo principal central de inércia que mobiliza a direcção de menor inércia, z é a abcissa do eixo longitudinal da peça, n é um número inteiro e l é o comprimento de encurvadura da peça linear biarticulada. A letra n assume uma variabilidade que está directamente associada aos modos de encurvadura, correspondendo a configurações de deformada diferentes, tal como se representa na figura 3.3.

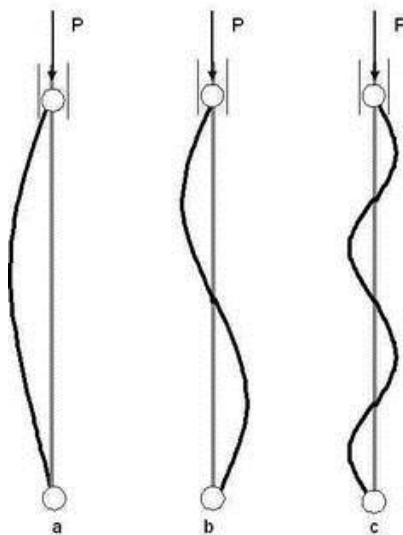


Fig.3.3 – Modos de encurvadura [18]: a) $n=1$, b) $n=2$ e c) $n=3$.

Designa-se por carga crítica P_{cr} a carga que corresponde ao primeiro modo de encurvadura, ou seja quando n assume o valor 1. A carga de encurvadura será tanto menor quanto maior for a esbeltez da peça, definida pela relação entre o comprimento de encurvadura da peça e o raio de giração relativo ao plano com maior esbelteza.

3.3.2. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO USADO

O programa de cálculo automático usado na modelação numérica das paredes de tabique foi o SAP 2000. Trata-se de um programa de elementos finitos, com interface gráfica 3D, orientado a objectos, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, a modelação, análise e dimensionamento de um vasto conjunto de problemas de engenharia de estruturas [12]. Para o caso concreto, o problema que se pretende analisar diz respeito à instabilidade de peças (fenómeno de encurvadura), verificando-se que o programa permite análises deste tipo, justificando a sua adopção neste estudo. O programa

SAP 2000 apresenta uma grande flexibilidade quanto ao tipo de estruturas que permite analisar e tem uma vasta aplicação por todo o mundo, tratando-se de um programa comercial de âmbito geral.

3.4. APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS

3.4.1. TIPOLOGIAS ESTUDADAS

Para a definição dos modelos físicos que serviram de base ao estudo efetuado, foram seleccionadas duas tipologias de tabique: paredes de tabique com tábuas simples e paredes de tabique com tábuas duplas. A primeira tipologia considerada nos modelos numéricos diz respeito a tabique simples. A sua construção é realizada através de tábuas verticais costaneiras, sendo que entre elas existe uma pequena folga ao longo de toda a sua altura. Estas tábuas podem ser pregadas a frechais, no topo e na base, recebendo de um lado e do outro um fasquiado com secção transversal trapezoidal.

Embora a disposição mais tradicional apresente um tabuado simples (tabique simples), foi simulada também a tipologia de tabuado duplo (tabique duplo): o primeiro plano de tábuas tem um alinhamento vertical e o segundo é disposto na diagonal segundo diferentes geometrias, constatando-se que o conjunto destas duas tábuas totaliza, normalmente, a mesma espessura do tabuado vertical da parede simples. Os restantes elementos da estrutura, neste caso o fasquio e aos frechais, já que não será simulado o reboco, apresentam a mesma forma e distribuição em ambos os tipos de paredes.

Escolhidas as tipologias que servem de base ao estudo efetuado, o próximo passo consiste em definir os modelos que se pretendem analisar.

3.4.2. MODELOS DEFINIDOS

Partindo das duas tipologias de paredes seleccionadas, foram definidos quatro modelos físicos de paredes de tabique. A estes modelos foi atribuída a designação de S, SA, SP e D.

O modelo S representa uma parede de tabique simples sem aberturas, ou seja enquadrado na primeira tipologia apresentada, representando o modelo de referência. É composto por 23 tábuas verticais com uma secção de $15 \times 4 \text{ cm}^2$, com uma folga de 2 cm entre elas. O conjunto de tábuas que constitui a parede confere-lhe um comprimento de 3,89 m e uma altura igual à das tábuas (3m), à qual se adiciona a altura do frechal superior e inferior. Relativamente ao fasquiado, foi simulado dos dois lados da parede (fasquio excêntrico), sendo constituído, em cada face, por 52 alinhamentos de ripas contínuas com o formato típico trapezoidal, com uma folga de 3,80 cm entre elas e ligados a cada uma das tábuas por intermédio de pregos (um por tábua). As dimensões da secção transversal destas ripas (trapezoidal) são de 2,5 cm para o lado maior, 2,0 cm para o menor e 1,5 cm para a altura. Por fim, existem dois elementos de madeira dispostos horizontalmente, os frechais superior e inferior, que têm uma secção de $8 \times 8 \text{ cm}^2$ e fecham a parede na base e no topo. A representação esquemática deste modelo encontra-se na figura 3.4.

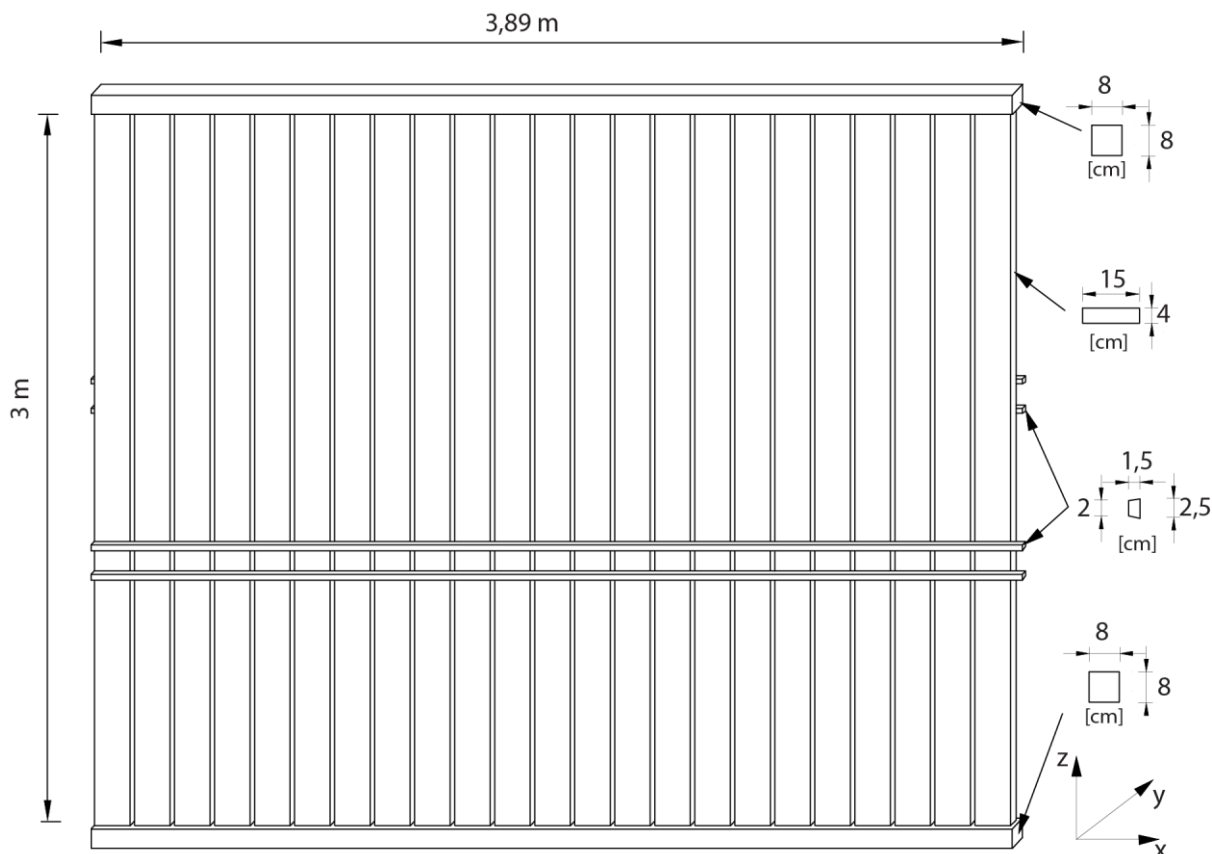


Fig.3.4 – Modelo S

O modelo SA representa o modelo S simplificado. Numa parede de tabique, a colocação do fasquio é feita dos dois lados, sendo que ambos são ligados às tábuas através de pregos. Neste modelo optou-se por transformar o duplo fasquiado presente de um lado e do outro num fasquiado único, centrado e ligada rigidamente às tábuas. Assim, calculada a inércia conjunta segundo o eixo dos yy (figura 3.5) das duas ripas, bem como a sua área, procurou encontrar-se uma peça única com os mesmos valores destas propriedades geométricas. Uma vez que o fasquio na análise à encurvadura só “trabalha” na direcção y, a inércia segundo o eixo dos xx não foi respeitada. Chegou-se assim a uma peça com uma base de 9,64cm e uma altura de 0,7 cm. Os cálculos detalhados relativos a este procedimento são a seguir apresentados, juntamente com as figuras 3.5 e 3.6, para o fasquio excêntrico e centrado, respectivamente.

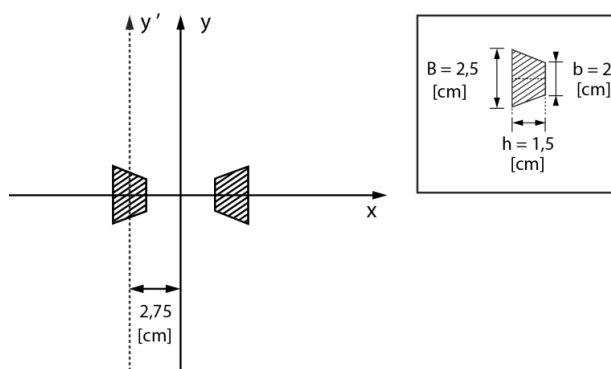


Fig.3.5 - Fasquio excêntrico

$$I_y' = \frac{h^3 x (b^2 + 4bB + B^2)}{36(b+B)} = 0,630208333 \text{ cm}^2 \quad (3.4)$$

$$I_y = 2 \times (I_y' + A \times y_c^2) = 2 \times (0,630208333 + 3,375 \times 2,75^2) = 52,307 \text{ cm}^4 \quad (3.5)$$

$$A = \left(\frac{(B+b)}{2} \times h \right) \times 2 = \left(\frac{(2,5+2)}{2} \times 1,5 \right) \times 2 = 6,75 \text{ cm}^2 \quad (3.6)$$

Determinada a área e a inércia, em relação ao eixo dos yy, obtêm-se os valores para a base e altura do novo elemento.

$$\begin{cases} A = b \times h \\ I_y = \frac{h \times b^3}{12} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 6,75 = b \times h \\ 52,307 = \frac{h \times b^3}{12} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} h = 0,7 \text{ cm} \\ b = 9,64 \text{ cm} \end{cases} \quad (3.7)$$

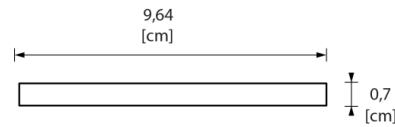


Fig.3.6 - Fasquio centrado

Assim, para este modelo foram colocadas 63 ripas de madeira contínuas, centradas. Este modelo foi criado para verificar de que modo os resultados se alterariam caso se reduzisse a complexidade de simulação das paredes, neste caso através da consideração do fasquio centrado no eixo da parede. Na figura 3.7 pode ver-se a representação esquemática deste modelo, ao qual foi atribuída a designação de modelo SA por se tratar de um modelo de uma parede simples alterada.

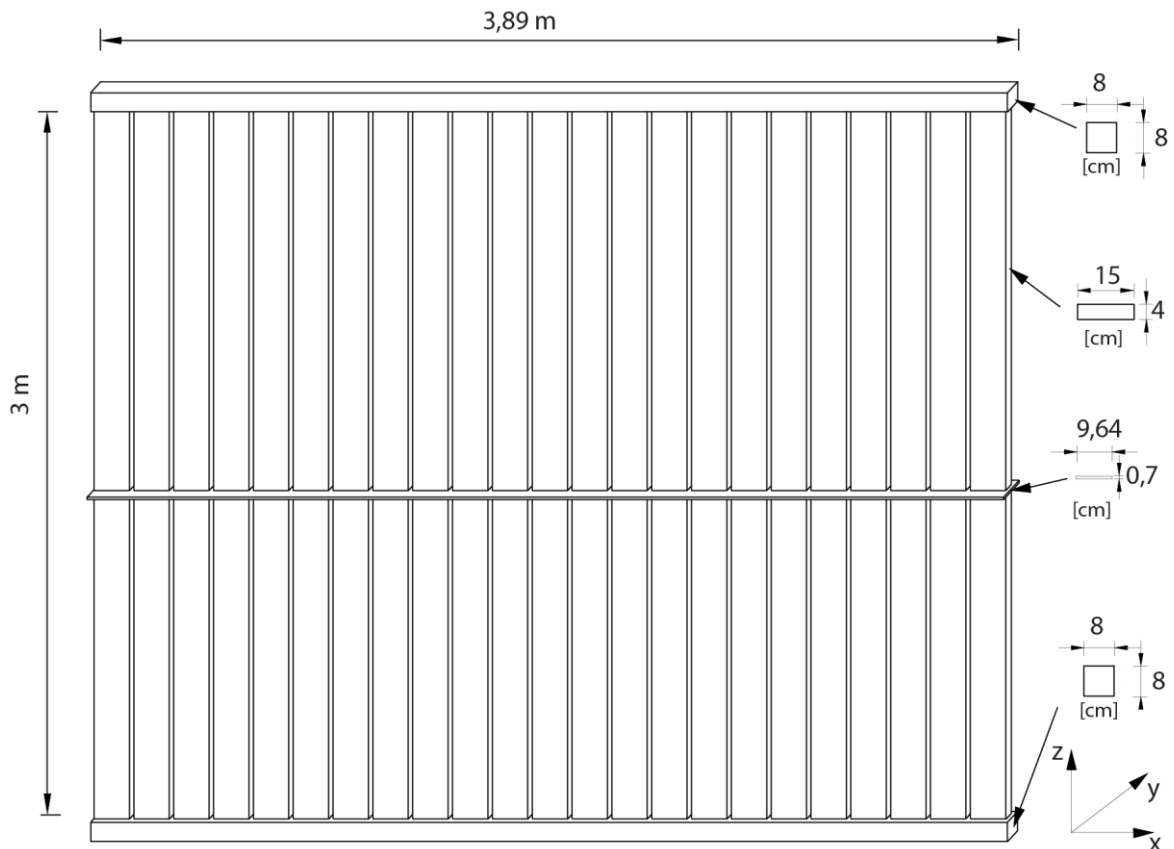


Fig.3.7 – Modelo SA

De maneira a estudar os casos de paredes com aberturas, surgiu a necessidade de criar o modelo SP que é em tudo semelhante ao modelo S, tendo a particularidade de representar uma abertura, porta. A delimitação desta porta é feita por meio de prumos que apenas encostam nos elementos adjacentes, representando uma situação real. Os prumos têm uma seção de 7x7 cm, e a porta está localizada a meio da parede com 1,03 m de largura e 2,39 m de altura. A parede tem um comprimento de 3,89 m e uma altura de 3 m para as tábuas verticais. As tábuas referidas têm uma seção de 15 x 4 cm² e uma folga de 2 cm entre elas. O modelo é constituído por 52 ripas de madeira com a seção trapezoidal já referida anteriormente, sendo interrompidas na zona da abertura que é delimitada pelos prumos. À semelhança dos modelos anteriores, são ainda colocados o frechal superior e inferior com uma seção de 8 x 8 cm². A representação esquemática deste modelo é apresentada na figura 3.8.

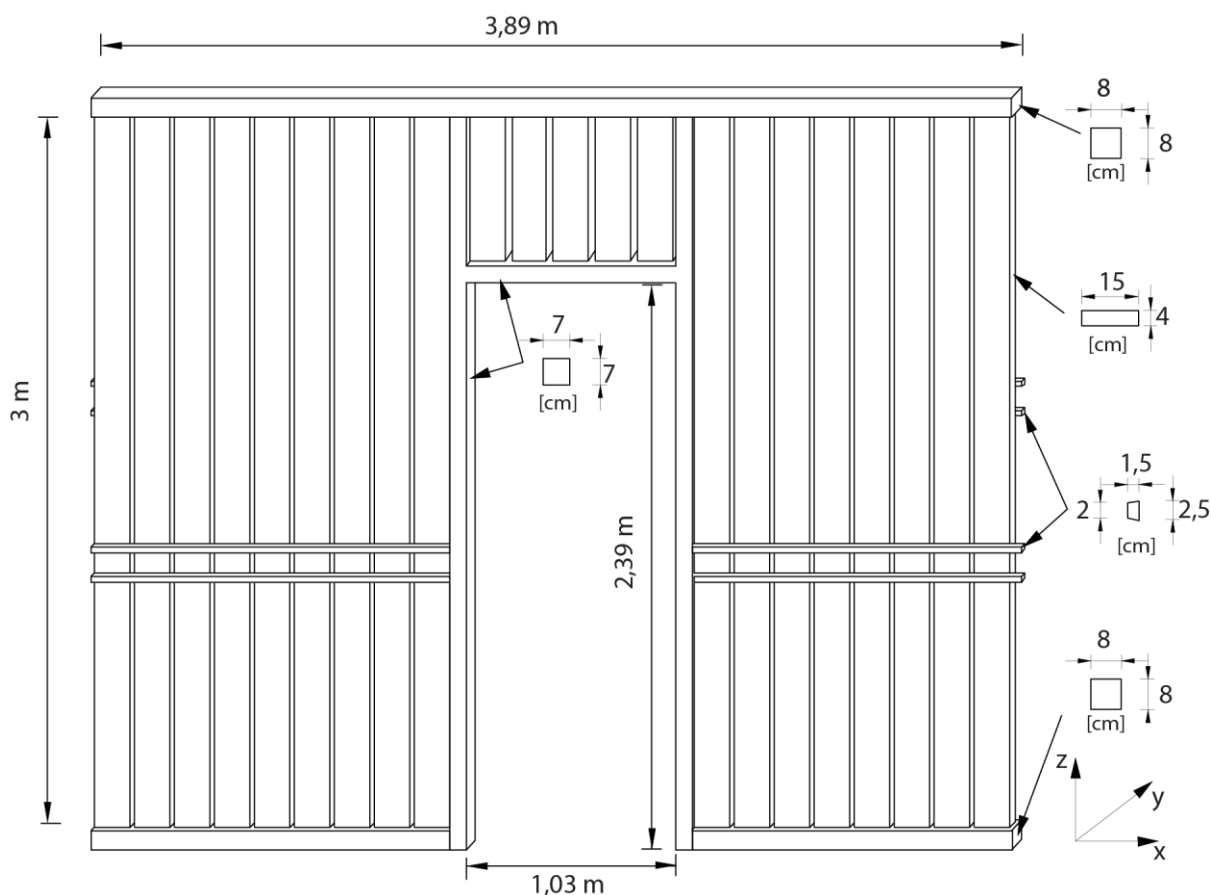


Fig.3.8 – Modelo SP

Finalmente, o modelo D é o modelo correspondente à tipologia de parede dupla encontrada. Este modelo é constituído por tábuas verticais e diagonais. A espessura total que as paredes duplas assumem é a mesma das paredes simples, 4 cm. Assim, as duas tábuas apresentam uma espessura de 2 cm. A seção para a tábua vertical é de 15 x 2 cm², e a tábua diagonal tem uma seção de 20 x 2 cm². O comprimento total da parede é, tal como nos modelos anteriores, de 3,89 m, mantendo-se também o valor de 3 m para a altura das tábuas. As 52 ripas existentes têm o formato trapezoidal já referido e ligam-se às tábuas por intermédio de pregos. Tal como nos modelos anteriores, existem dois elementos de madeira dispostos horizontalmente nos topos, os frechais superior e inferior com uma seção de 8 x 8 cm². Para este caso, o esquema que traduz o modelo definido é apresentado na figura 3.9, ou seja com tábuas diagonais convergentes no centro da parede.

Todas as restantes medidas adotadas nos elementos que constituem o tabique correspondem aos valores já apresentados para as paredes anteriores, ou seja a valores que se encontram dentro do intervalo de valores que se considera comum neste tipo de paredes.

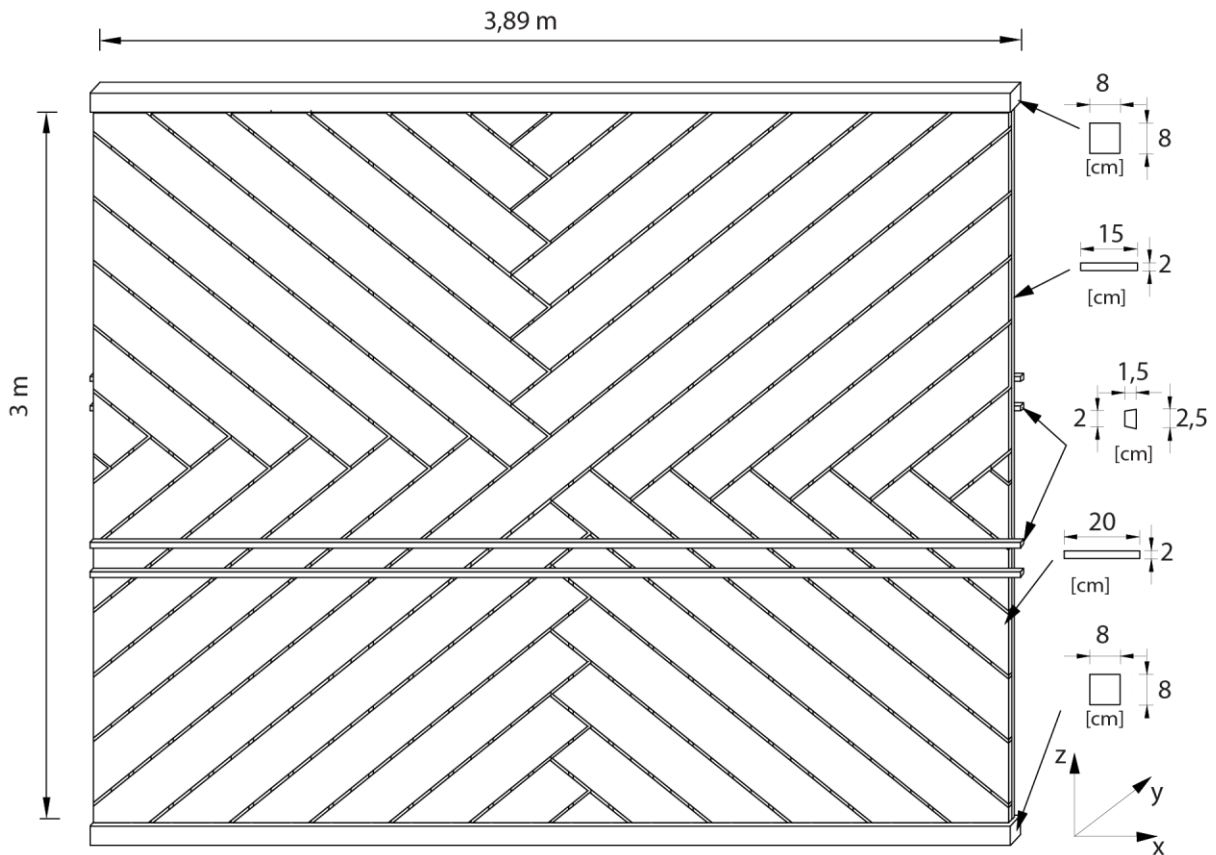


Fig.3.9 – Modelo D

3.5. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE PAREDES DE TABIQUE

3.5.1. INTRODUÇÃO

Nesta fase do trabalho pretende-se apresentar os modelos numéricos que foram criados no programa SAP2000 para simular os modelos físicos das paredes de tabique descritos no ponto 3.4. No entanto, por forma a validar a análise de encurvadura (modos e cargas críticas) efectuada pelo programa, antes da criação dos modelos das paredes foi analisada uma tábua de madeira isolada sujeita a uma carga de compressão axial. Esta análise / verificação prévia é apresentada no ponto seguinte. Só posteriormente são apresentadas as análises de encurvadura das paredes submetidas a acções verticais.

3.5.2. ESTUDO DE UMA TÁBUA DE MADEIRA

3.5.2.1. Descrição do modelo de cálculo

Como aplicação e verificação da análise à encurvadura efectuada pelo programa SAP2000 foi simulada uma tábua vertical de uma parede de tabique através de elementos de viga. Este modelo, que serviu para avaliar a capacidade resistente de uma tábua isolada, para depois validar o modelo em todo

o seu conjunto, é constituído por uma peça linear biarticulada. A tábua tem uma seção transversal de $15 \times 4 \text{ cm}^2$ e um comprimento de 3 m. O material que se considerou no modelo é o correspondente à madeira de pinho da classe de resistência C18, que é a espécie que se destaca na construção das paredes deste tipo. Na tabela 3.1 apresentam-se as propriedades mecânicas e físicas correspondentes.

As propriedades materiais adotadas para a madeira de pinho nacional da classe de qualidade 'E' estão de acordo com a norma NP 4305 [1995], [19] e correspondem à classe de resistência das madeiras resinosas C18 definidas na norma EN338 [2003] [20].

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas e físicas da classe de resistência C18 da madeira de pinho nacional

E_{mean} (GPa)	$E_{0,05}$ (GPa)	G_{mean} (GPa)	ρ_{mean} (kg/m ³)	$f_{c,0,k}$ (MPa)	$f_{t,0,k}$ (MPa)	$f_{v,k}$ (MPa)	$f_{m,k}$ (MPa)
9	6	0,56	380	18	11	2	18

De forma a modelar numericamente a tábua vertical, simulou-se um elemento linear discretizado em elementos do tipo viga tridimensionais ("Frame" da biblioteca do SAP2000), ou seja com seis graus de liberdade por nó. Na extremidade superior da tábua restringiram-se os deslocamentos nas direcções x e y, ficando livre o deslocamento correspondente à direcção z, vertical; na extremidade inferior restringiram-se os deslocamentos x, y e z e a rotação na direcção z. Na figura 3.10 é apresentado um esquema para o modelo de cálculo estrutural da tábua isolada com a indicação dos respetivos eixos.

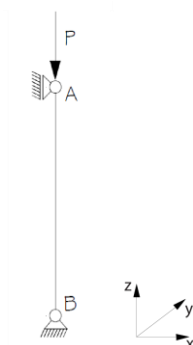


Fig.3.10 – Modelo de cálculo estrutural de uma tábua vertical isolada

Relativamente à seção transversal da tábua estudada, foram introduzidas no programa de cálculo as seguintes propriedades geométricas: área, momento de inércia e raio de giração em torno de cada um dos eixos principais de inércia. Estas propriedades estão indicadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Propriedades geométricas da seção transversal da tábua de madeira

Propriedade	Valores
Área	$0,006 \text{ m}^2$
Momento de inércia segundo xx	$8 \times 10^{-7} \text{ m}^4$
Momento de inércia segundo yy	$1,125 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
Raio de giração segundo xx	$0,01155 \text{ m}$
Raio de giração segundo yy	$0,04330 \text{ m}$

3.5.2.2. Validação do modelo no programa SAP2000

Construído o modelo numérico da tábua, compararam-se os resultados analíticos com os resultados numéricos obtidos através do programa e correspondentes aos 3 primeiros modos de encurvadura.

Tendo em conta que os resultados da análise de elementos finitos dependem do número de elementos em que a peça linear é dividida, foi realizado um refinamento da malha de elementos de viga de modo a determinar o número mínimo de elementos que devem ser adoptados na discretização da peça linear para que os resultados numéricos se aproximassem o mais possível dos resultados analíticos (teoria de Euler).

Na tabela 3.3 são apresentados por ordem os resultados numéricos correspondentes às três primeiras cargas de encurvadura considerando 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40 elementos de viga. Com recurso à teoria de Euler foi obtido, de forma analítica, o valor exato da carga de encurvadura, exibido também na tabela de acordo com a equação 3.3.

Tabela 3.3 – Validação dos resultados obtidos através do programa SAP2000

Carga de encurvadura							
Teoria de Euler	SAP 2000						
-	Discretização (número de elementos)						
-	1	2	5	10	20	30	40
7,893	9,632	7,979	7,921	7,919	7,919	7,919	7,919
31,583	48,181	38,528	31,750	31,652	31,645	31,644	31,644
71,061	135,451	103,333	72,184	71,163	71,082	71,076	71,075

Através da análise dos resultados da tabela 3.3 verifica-se que na resolução de problemas de encurvadura os elementos lineares sujeitos a esforços de compressão devem ser analisados com uma discretização de pelo menos 5 elementos; o valor da carga de encurvadura não sofre alterações significativas quando a discretização é feita com um maior número de elementos, garantindo-se assim o rigor necessário. Na figura 3.11 apresenta-se a configuração da deformada correspondente ao primeiro modo de encurvadura, com recurso a uma representação esquemática e à imagem obtida através do programa de cálculo, respectivamente. Na figura 3.12 apresenta-se a configuração da deformada correspondente ao segundo e terceiro modo de encurvadura

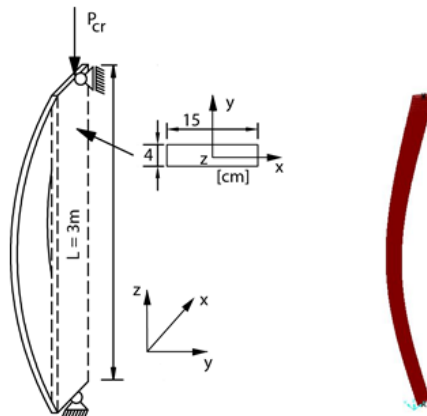


Fig.3.11 – 1º modo de encurvadura do modelo estrutural

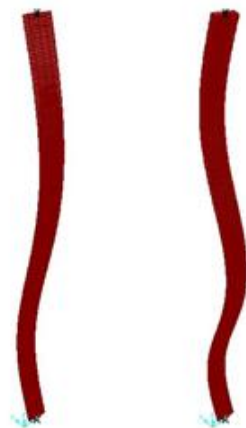


Fig.3.12 – 2º e 3º modo de encurvadura do modelo estrutural

Mostra-se também que a capacidade resistente de uma tábua sem encurvadura, F , é muito maior do que o valor da carga crítica, p_{cr} . Assim tem-se que:

$$\sigma \times L \times e > p_{cr} \quad (3.8)$$

onde $\sigma = 18 \times 10^3$ kPa (capacidade resistente da madeira à compressão na direcção das fibras), $L = 0,15$ m (comprimento da tábua), $e = 0,04$ m (espessura da tábua) e $p_{cr} = 7,89$. Substituindo agora os valores na equação, vem:

$$18 \times 10^3 \times 0,15 \times 0,04 = 108 \text{ kN} \gg 7,89 \text{ kN} \quad (3.9)$$

Este resultado evidencia que, se a barra não instabilizasse, resistiria a uma carga de 108 kN, em oposição à carga crítica de apenas 7,89 kN que apresenta e que resulta da sua elevada esbeltez.

3.5.3. MODELO FÍSICO BASE

Nesta seção, relativa à modelação das paredes, apresentam-se os modelos considerados como referência para cada dos modelos físicos S, SA, SP e D a analisar e que serão referidos, respetivamente, como: S-base, SA-base, SP-base e D-base.

Todas as paredes analisadas encontram-se ligadas rigidamente num frechal inferior que se considera ligado ao exterior (condição de fronteira) através de uma ligação tripla, ou seja que impede as três translações. A escolha da ligação rígida das tábuas ao frechal foi uma opção assumida, apesar de não corresponder exatamente à realidade. Assim, e relativamente a todos os modelos designados por base, inferiormente a parede está impedida de se deslocar na direcção do seu plano (x e z) e na direcção perpendicular ao plano (y), não sendo restringida qualquer rotação. Superiormente, a parede está restringida nas direcções x e y , ou seja, está impedida de se deslocar na direcção horizontal. Nos topos laterais, quer esquerdo, quer direito, considerou-se que a parede poderá estar em contacto com outras paredes transversais, mas sem qualquer vínculo, ou seja não foi impedido qualquer deslocamento ou rotação nesses topos. Esta última condição corresponde ao que é habitual em paredes deste tipo; as paredes de tabique tocam nas paredes transversais sem que haja ligações efetivas entre elas.

3.5.3.1. Modelos numéricos

Depois de definidas as condições que servem os quatro modelos numéricos base, segue-se a sua apresentação / descrição. Aos modelos foi atribuída a designação dos modelos físicos que representam: S, SA, SP e D.

Nos quatro modelos numéricos as tábuas verticais de madeira, as vigas dos frechais, as ripas e os prumos que delimitam a abertura do modelo SP, ou seja todos os elementos que constituem o tabique, são modelados numericamente de forma similar e adotando elementos tipo viga tridimensional (Frame na biblioteca do SAP 2000). O elemento de viga é um elemento utilizado para modelar peças lineares e tem 6 graus de liberdade por nó (3 translações e 3 rotações). As propriedades mecânicas consideradas nos elementos estruturais de madeira foram as correspondentes à madeira de pinho da classe C18, tal como indicado anteriormente na seção relativa ao estudo de uma tábua de madeira isolada. Estas propriedades estão expostas na tabela 3.1.

Para além da madeira, o material aço é também usado na modelação numérica das paredes de tabique, já que representa o material constituinte dos pregos, apresentando-se na tabela 3.4 as suas propriedades materiais.

Tabela 3.4 – Propriedades materiais do aço dos pregos

E (GPa)	ν	ρ_{mean} (kN/m ³)
199	0,3	76,97

O modelo numérico S é o primeiro a ser modelado e analisado. Este modelo é constituído por 23 tábuas verticais, simuladas por 53 de elementos de viga, 52 ripas de madeira em cada face, sendo cada uma simulada por 24 elementos de viga, e pelos frechais, superior e inferior, simulados numericamente por 24 elementos de viga cada. O modelo é composto por 3846 nós, dos quais 50 estão sujeitos a condições de apoio que restringem movimentos. O número total de elementos de viga associados a este modelo é 6155. As ripas de madeira são definidas da forma mais semelhante à realidade, ou seja colocadas de forma excêntrica em cada uma das faces da parede. Ao longo das tábuas verticais, e em ambas as faces, são modelados pregos através de elementos de viga (cada prego é constituído por um elemento de viga) dispostos ao longo do eixo y, ou seja perpendicularmente ao plano da parede, na ligação das ripas às tábuas; os pregos foram modelados como tendo uma rigidez axial e à flexão muito alta, e uma rigidez à torção muito baixa. Neste modelo as ripas têm um formato trapezoidal (a face mais larga, com 2,5 cm, encontra-se do lado de fora), sendo que a face interior tem um comprimento de 2 cm e uma altura de 1,5 cm. A folga entre ripas é de 3 cm, ao qual corresponde um afastamento entre eixos longitudinais de 5,5 cm. Por sua vez, a seção transversal dos pregos foi considerada quadrada de dimensões 3 x 3 mm². Na tabela 3.5 apresentam-se as propriedades geométricas e mecânicas relativas à seção transversal das tábuas de madeira verticais, e na tabela 3.6 e 3.7 as propriedades geométricas das ripas e dos pregos do modelo em análise, respetivamente. Na tabela 3.8 são apresentadas as propriedades geométricas relativas à seção transversal dos frechais superior e inferior.

Tabela 3.5 – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal das tábuas de madeira verticais

Propriedade	Valores
Área	0,006 m ²
Momento de inércia segundo xx	8x10 ⁻⁷ m ⁴
Momento de inércia segundo yy	1,125x10 ⁻⁵ m ⁴
Raio de giração segundo xx	0,01155 m
Raio de giração segundo yy	0,04330 m

Tabela 3.6 – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal das ripas

Propriedade	Valores
Área	0,0003375 m ²
Momento de inércia segundo xx	6,302x10 ⁻⁰⁹ m ⁴
Momento de inércia segundo yy	1,441x10 ⁻⁰⁸ m ⁴
Raio de giração segundo xx	0,00432 m
Raio de giração segundo yy	0,00653 m

Tabela 3.7 – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal dos pregos

Propriedade	Valores
Área	9x10 ⁻⁶ m ²
Momento de inércia segundo xx	6,75x10 ⁻¹² m ⁴
Momento de inércia segundo yy	6,75x10 ⁻¹² m ⁴
Raio de giração segundo xx	8,66x10 ⁻⁴ m
Raio de giração segundo yy	8,66x10 ⁻⁴ m

Tabela 3.8 – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal do frechal superior e inferior

Propriedade	Valores
Área	0,0064 m ²
Momento de inércia segundo xx	3,413x10 ⁻⁵ m ⁴
Momento de inércia segundo yy	3,413x10 ⁻⁵ m ⁴
Raio de giração segundo xx	0,0231 m
Raio de giração segundo yy	0,0231 m

A seguir apresenta-se o modelo SA, que foi criado com o intuito de introduzir uma simplificação no modelo S. Neste modelo optou-se por “transformar” o fasquiado presente de um lado e do outro da parede numa só ripa, centrada e ligada rigidamente às tábuas, considerando as características das duas ripas presentes só numa. O modelo SA é constituído por 23 tábuas verticais simuladas numericamente por 53 elementos de viga, 63 ripas e pelos frechais superior e inferior, ambos simuladas numericamente por 24 elementos de viga. Este modelo é constituído por 2499 nós sendo que 50 deles estão restringidos, ainda e por 3906 elementos de viga. As ripas de madeira têm uma folga de 3,80 cm entre elas, correspondendo a um afastamento entre eixos de 4,77 cm e intersectam as tábuas verticais, sendo que cada uma tem um comprimento total igual ao comprimento da parede. O eixo longitudinal

de cada ripa intersecta o eixo longitudinal das tábuas verticais tendo sido admitida uma ligação rígida em cada ponto de intersecção. Neste modelo numérico considerou-se que a seção transversal das ripas tem uma largura de 0.7 cm e uma espessura de 9.64 cm que corresponde a uma seção com as mesmas características das duas ripas excêntricas que se consideraram nas paredes de tabique. As propriedades geométricas e mecânicas da seção das ripas estão apresentadas na tabela 3.9 que contém a área da seção transversal, os momentos de inércia e os raios de giração relativamente a cada um dos eixos principais de inércia. As propriedades geométricas das seções relativas à tábua de madeira vertical e aos frechais superior e inferior coincidem com as do modelo S, já que para este modelo apenas se altera o fasquio (tabelas 3.5 e 3.8, respetivamente).

Tabela 3.9 – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal das ripas

Propriedade	Valores
Área	0,0006748 m ²
Momento de inércia segundo xx	2,755x10 ⁻⁹ m ⁴
Momento de inércia segundo yy	5,22574x10 ⁻⁷ m ⁴
Raio de giração segundo xx	0,00202 m
Raio de giração segundo yy	0,02783 m

Ainda dentro da modelação de paredes de tabique simples, existe o modelo numérico SP que é em tudo semelhante ao modelo S, mas com a particularidade de incluir uma abertura, neste caso uma porta. O modelo é constituído por 52 ripas de madeira em cada face, interrompidas na zona da abertura que é delimitada pelos prumos. O fasquio é colocado desde a extremidade esquerda até à porta e da porta até à extremidade direita, sendo que na zona da porta os prumos e o fasquio apenas se tocam. As ripas que se encontram do lado esquerdo e do lado direito da porta são simuladas numericamente por 10 elementos de viga. As que se situam no pano de parede que está acima da porta são simuladas numericamente por 6 elementos de viga. O modelo é constituído por 22 tábuas verticais e por dois prumos, ambos simulados numericamente por 53 elementos de viga. Este modelo tem um total de 3281 nós, estando 47 sujeitos a condições de apoio que restringem movimentos, e de 4927 elementos de viga. Os frechais superior e inferior são simulados numericamente por 24 elementos de viga, cada. À exceção dos prumos verticais, os elementos que constituem o modelo SP são os mesmos que constituem o modelo S. Assim, as propriedades geométricas e mecânicas relativas à seção transversal de todos os elementos apresentadas nas tabelas 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 para o modelo S são válidas para o modelo SP. As propriedades geométricas relativas à seção transversal dos prumos são apresentadas na tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Propriedades geométricas e mecânicas da seção transversal dos prumos

Propriedade	Valores
Área	0,0049 m ²
Momento de inércia segundo xx	2,0008x10 ⁻⁶ m ⁴
Momento de inércia segundo yy	2,0008x10 ⁻⁶ m ⁴
Raio de giração segundo xx	0,020207 m
Raio de giração segundo yy	0,020207 m

O modelo D, que surge em último lugar, representa uma parede de tabique dupla, contendo tábuas verticais e diagonais. Estes dois conjuntos de tábuas estão rigidamente ligados entre si nos pontos em que os seus eixos se intersectam. Este modelo contém 23 tábuas verticais e 43 tábuas diagonais, é constituído por 4668 nós, estando 50 restringidos por condições de apoio, e por 7189 elementos de viga. As ripas são simuladas numericamente por 24 elementos de viga e perfazem um total de 52. A folga entre as ripas é de 3 cm, que corresponde a um afastamento longitudinal entre eixos de 5,5 cm. O frechal superior e inferior e as ripas deste modelo têm as mesmas dimensões dos frechais e das ripas do modelo S. Assim, as propriedades geométricas relativas à seção transversal destes elementos são as mesmas, tendo sido apresentadas nas tabelas 3.8 e 3.6. As propriedades geométricas relativas à seção transversal das tábuas de madeira verticais e diagonais associadas a este modelo são apresentadas nas tabelas 3.11 e 3.12 respetivamente.

Tabela 3.11 – Propriedades geométricas da seção transversal da tábua de madeira vertical

Propriedade	Valores
Área	0,003 m ²
Momento de inércia segundo xx	1,0X10 ⁻⁵ m ⁴
Momento de inércia segundo yy	5,625x10 ⁻⁶ m ⁴
Raio de giração segundo xx	0,00577 m
Raio de giração segundo yy	0,0433 m

Tabela 3.12 – Propriedades geométricas da seção transversal da tábua de madeira diagonal

Propriedade	Valores
Área	0,004 m ²
Momento de inércia segundo xx	1,333X10 ⁻⁷ m ⁴
Momento de inércia segundo yy	1,333x10 ⁻⁵ m ⁴
Raio de giração segundo xx	0,00577 m
Raio de giração segundo yy	0,0577 m

Nas figuras 3.13 são apresentadas vistas 3D de cada um dos modelos numéricos estudados, retiradas do programa de cálculo automático.

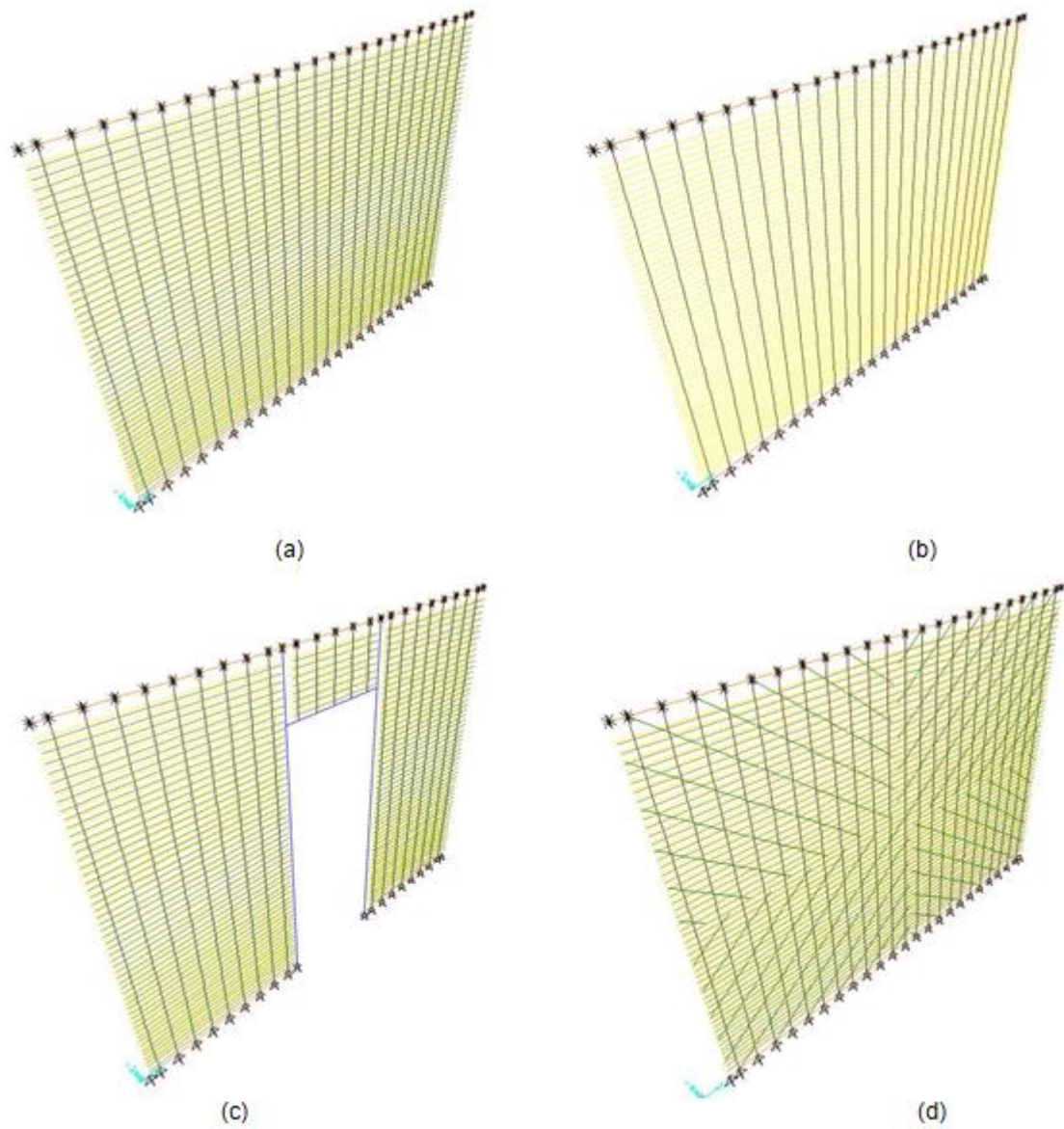


Fig.3.13 – (a) Modelo S; (b) Modelo SA; (c) Modelo SP; Modelo D

4

ANÁLISE À ENCURVADURA

4.1. OBJETIVOS

Os objectivos deste capítulo são:

- Simular numericamente o comportamento à encurvadura de paredes de tabique;
- Simular numericamente o comportamento à encurvadura de paredes de tabique com anomalias;
- Simular numericamente o comportamento à encurvadura de paredes de tabique propondo diferentes condições de fronteira;
- Compreender a influência das ripas de madeira e das condições de fronteira da parede na capacidade resistente à compressão destes elementos construtivos.

4.2. PRESSUPOSTOS DE CÁLCULO

Neste capítulo será simulado o comportamento estrutural das paredes de tabique, avaliando as cargas verticais críticas, ou seja a capacidade resistente vertical dessas paredes quando se considera o fenómeno de encurvadura. Por opção, e tal como se referiu anteriormente, nestas análises não se modelou o material de enchimento e de reboco das paredes. No entanto, este material existe e contribui positivamente para a resistência das paredes, impedindo, simultaneamente, que ocorram modos de encurvadura localizados.

Será avaliada a capacidade resistente das paredes simuladas e, entre outros aspectos, estimada a contribuição estrutural do fasquio e a sua preponderância na capacidade resistente deste tipo de elemento construtivo. Nas análises é considerada como acção uma carga uniformemente distribuída, atuante no plano da parede, com a direcção e o sentido da acção gravítica (vertical descendente), aplicada ao longo do frechal superior.

4.3. MODELOS BASE

Feita a apresentação e descrição de cada um dos modelos numéricos representativos das paredes em estudo, procede-se agora à sua análise, avaliando a configuração dos modos de encurvadura bem como os respetivos valores das cargas críticas.

Posto isto, o modelo S-base, de tabuado simples e fasquio excêntrico, é o primeiro modelo a ser analisado. Na figura 4.1, mostra-se a configuração da deformada da estrutura da parede correspondente ao primeiro modo de encurvadura e ao cenário de carga definido.

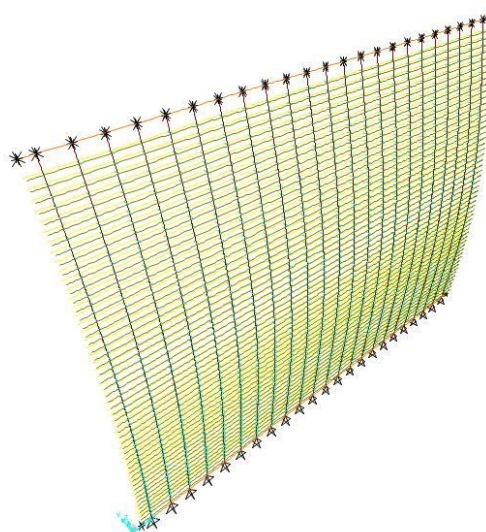


Fig.4.1 – Modelo S-base

No que toca à configuração da deformada, verifica-se que todas as tábuas encurvam em torno do seu eixo de menor inércia, no mesmo sentido e ao mesmo tempo, correspondendo a uma carga crítica uniformemente distribuída no topo da parede de $p_{cr}=46,4$ kN/m. Pode, por isso, facilmente validar-se este resultado dividindo o valor da carga crítica de uma tábua isolada determinado anteriormente ($p_{cr}=7,893$ kN/m) pelo comprimento de influência de cada tábua ($L=0,17$ m): $7,893/0,17=46,4$ kN/m. A instabilidade da parede S acontece no plano perpendicular ao plano da parede por corresponder à direcção de menor inércia da seção transversal das tábuas.

Seguidamente, na figura 4.2, mostra-se a configuração da deformada da estrutura da parede correspondente ao primeiro modo de encurvadura do modelo numérico SA-base.

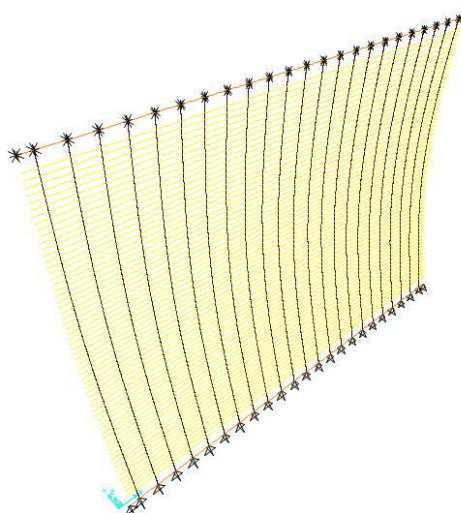


Fig.4.2 – Modelo SA-base

Tal como no modelo S-base, o 1º modo de encurvadura da parede corresponde a uma configuração deformada em que todas as tábuas encurvam em torno do seu eixo de menor inércia, no mesmo sentido e ao mesmo tempo, sendo a respectiva carga crítica uniformemente distribuída igual a $p_{cr}=46,4$ kN/m.

A diferença deste modelo, relativamente ao modelo S, está unicamente na colocação do fasquio que no modelo S aparece excêntrico, com recurso a pregos, tratando-se de um modelo mais próximo da realidade, e aqui surge centrado, ligado de forma contínua às tábuas.

O valor da carga crítica sugere que a inclusão das ripas nas condições atuais não favorece estruturalmente a parede de tabique, já que é o mesmo para os modelos S e SA. Para ambos os modelos, o emprego das ripas faz com que a parede encurve de uma forma global, garantindo a ligação entre todos os elementos envolvidos, ao mesmo tempo que evita a ocorrência de modos localizados de encurvadura.

Na figura 4.3, mostra-se agora a configuração deformada da estrutura da parede correspondente ao primeiro modo de encurvadura do modelo numérico SP na situação base.

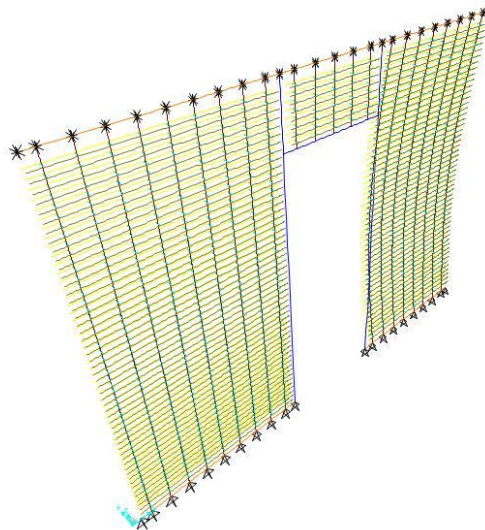


Fig.4.3 – Modelo SP-base

O primeiro modo de encurvadura desta parede de tabique corresponde à encurvadura em torno do eixo de menor inércia das tábuas verticais localizadas à direita da abertura. Verifica-se que existem nove tábuas verticais do lado esquerdo e oito do lado direito, sendo que a parede tende a encurvar do lado com menos tábuas, sendo o valor da carga crítica igual a $p_{cr}=38,7$ kN/m.

Apresenta-se a seguir o modelo numérico D, cuja configuração da deformada relativamente ao primeiro modo de encurvadura é exposta na figura 4.4.

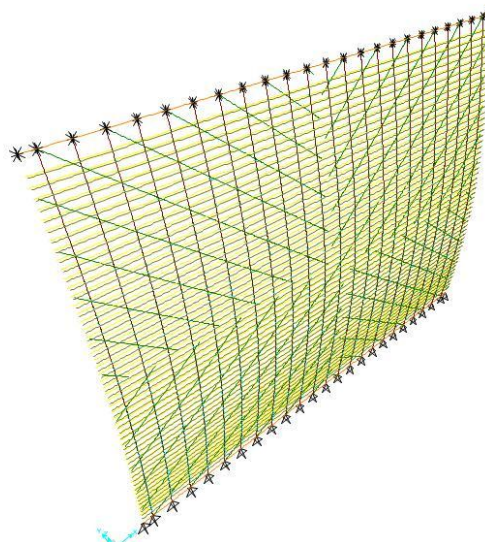


Fig.4.4 – Modelo D-base

Pode observar-se que o modo de encurvadura envolvido corresponde a uma configuração da deformada em que todas as tábuas verticais encurvam em torno do seu eixo de menor inércia, no mesmo sentido e ao mesmo tempo, arrastando com elas as tábuas diagonais, sendo a respectiva carga crítica $p_{cr}=7,8$ kN/m. Este resultado pode ser validado dividindo o valor da carga crítica de uma tábua vertical isolada com 2 cm ($p_{cr}=0,987$ kN/m) pelo comprimento de influência de cada tábua ($L=0,17$ m): $0,987/0,17=5,801$ kN/m. Este era o resultado que se obteria se a parede fosse apenas constituída pelas tábuas verticais de secção 15×2 cm². Consta-se que o incremento de resistência que as tábuas diagonais proporcionam, em termos do valor para a carga crítica é de 2,0 kN/m, ou seja de 25,6% e não de 50%, como seria espectável caso as tábuas diagonais apresentassem a mesma contribuição das tábuas verticais, valor que parece razoável. Este resultado permite concluir que este tipo de parede de tabuado duplo é bastante mais instável que a parede constituída por tábuas simples. Embora o conjunto de tábuas verticais e diagonais totalize a mesma espessura da parede S, verifica-se que as tábuas diagonais têm uma menor contribuição para a resistência à encurvadura da parede.

4.4. MODELOS BASE COM ANOMALIAS

Depois de definir os modelos padrão que dizem respeito ao tipo de paredes em análise, apresentam-se agora possíveis casos relacionados com a deterioração de tábuas, tentando simular degradações pontuais. De forma a verificar até que ponto determinadas anomalias associadas às tábuas verticais que constituem a parede põem em causa o funcionamento da sua estrutura, foram considerados quatro cenários de deterioração reproduzidos por uma redução do módulo de elasticidade em determinadas tábuas da parede. De referir que só se diminui a rigidez das tábuas de 9,0 GPa para 5,0 GPa, tendo-se considerado que a ligação das tábuas aos outros elementos continua perfeita, assim como se mantêm inalteradas todas as outras condições. O primeiro e o segundo cenário afetam a zona central, enquanto o terceiro e o quarto afetam o terço esquerdo da parede. Estes cenários adotam a designação de TF para tábua fraca, seguido de C ou T consoante as tábuas com o módulo de elasticidade reduzido se localizam no centro ou no terço esquerdo da parede, respetivamente, seguido do número de tábuas fracas consideradas.

Assim, os cenários propostos para a representação de anomalias são os seguintes:

- Cenário TFC1: Modelo com uma tábuas fraca no centro;
- Cenário TFC3: Modelo com três tábuas fracas no centro;
- Cenário TFT1: Modelo com uma tábuas fraca no terço esquerdo;
- Cenário TFT3: Modelo com três tábuas fracas no terço esquerdo.

Nesta seção são então estudados os modelos apresentados na tabela 4.1. No caso do modelo SP foram apenas introduzidas modificações nos terços da parede, dado que a zona central é ocupada pela abertura.

Tabela 4.1 – Modelos analisados

Parede simples			Parede dupla
Modelo S	Modelo SA	Modelo SP	Modelo D
S-TFC1	SA-TFC1	-	D-TFC1
S-TFC3	SA-TFC3	-	D-TFC3
S-TFT1	SA-TFT1	SP-TFT1	D-TFT1
S-TFT3	SA-TFT3	SP-TFT3	D-TFT3

Constata-se que quando os cenários que envolvem anomalias são aplicados aos modelos referidos, as configurações da deformada que se obtêm são iguais aos casos em que as paredes não apresentam qualquer tipo de degradação. A diferença reside unicamente no valor da carga crítica uniformemente distribuída que decresce em todos eles, devido ao fato de existirem zonas de menor rigidez. A diferença verificada nos valores das cargas é mínima, concluindo-se que, mesmo que a parede tenha uma zona com tábuas alteradas nas condições simuladas, isso não altera significativamente o comportamento geral da parede à encurvadura. Para este comportamento contribui, definitivamente, o fasquio que liga as tábuas e obriga a parede a ter uma deformada por encurvadura “homogênea”, atenuando o peso negativo das tábuas danificadas. Os valores para os casos estudados são apresentados nas tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, bem como os valores dos modelos base não danificados.

Tabela 4.2 – Carga crítica de encurvadura - modelo S

Modelo	Carga de encurvadura (kN/m)
S-base	46,4
S-TFC1	43,2
S-TFC3	41,4
S-TFT1	43,1
S-TFT3	41,3

Tabela 4.3 – Carga crítica de encurvadura - modelo SA

Modelo	Carga de encurvadura (kN/m)
SA-base	46,4
SA-TFC1	45,5
SA-TFC3	43,7
SA-TFT1	45,5
SA-TFT3	43,5

Tabela 4.4 – Carga crítica de encurvadura - modelo SP

Modelo	Carga de encurvadura (kN/m)
SP-base	38,7
SP-TFC1	-
SP-TFC3	-
SP-TFT1	37,3
SP-TFT3	33,4

Tabela 4.5 – Carga crítica de encurvadura - modelo D

Modelo	Carga de encurvadura (kN/m)
D-base	7,8
D-TFC1	7,7
D-TFC3	7,4
D-TFT1	7,7
D-TFT3	7,3

Verifica-se que a maior diferença percentual entre os valores obtidos e o valor da carga crítica associado ao modelo base é da ordem dos 13%, observando-se também que a diferença percentual é a mesma caso a zona afetada seja a zona central ou o terço esquerdo da parede. Conclui-se portanto que a importância e a relevância destas modificações é reduzida e que não têm praticamente influência no comportamento da parede nas condições analisadas.

4.5. INTERVENÇÕES IMPOSTAS SOBRE OS MODELOS

4.5.1. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Depois de definidos os modelos base e de possíveis cenários de deterioração, foram admitidos seis novos cenários associados a diferentes condições de fronteira que se podem encontrar, ou introduzir, nestas paredes, podendo algumas delas ser associadas a medidas de reforço estrutural. Assim, o primeiro cenário introduz uma pequena alteração no nó extremo esquerdo do frechal superior, que vê a sua translação em torno de z restringida, adicionando assim alguma rigidez à parede visto que há um movimento que não pode ser realizado naquele nó. Este cenário simula uma possível ligação da extremidade da parede a um ponto mais fixo, nomeadamente uma parede de alvenaria transversal. O segundo cenário é bastante semelhante ao cenário anterior e considera o impedimento do movimento na direcção z , mas desta vez nos dois nós extremos do frechal superior. O terceiro cenário pretende representar uma solução de reforço que passa pela introdução de cantoneiras de ligação da parede na base e no topo, restringindo a liberdade de rotação destas fronteiras. Para a escolha da cantoneira a utilizar recorreu-se ao catálogo Rothofixing da Rothoblaas relativo a carpintaria em madeira. As configurações principais podem ser observadas na figura seguinte.



Fig.4.5 – Cantoneiras de ligação viga-viga (esquerda) e viga-pilar (direita)

A junção pode ser efetuada com um angular individual, ou com dois angulares colocados simetricamente, como se pode observar na figura 4.6.

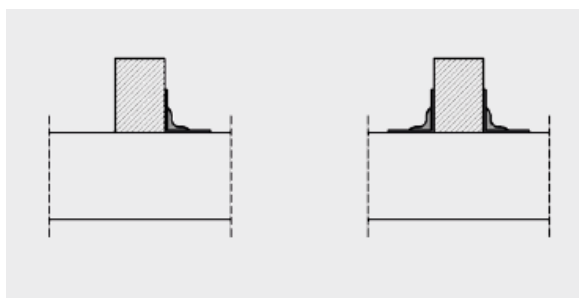


Fig.4.6 – Junção com angular individual ou dois angulares colocados simetricamente

As fixações podem ser realizadas através de pregos com aderência melhorada, ou com recurso a parafusos para placas.

Quanto aos materiais, a cantoneira é constituída por aço, com um módulo de elasticidade correspondente a 210 GPa. De entre o leque de possibilidades que o catálogo oferecia, a escolha recaiu sobre a cantoneira do tipo WHO ANGULAR 16080 que se representa na figura 4.7.

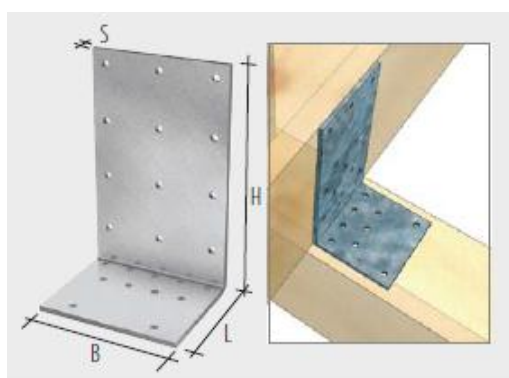


Fig.4.7 – Cantoneira escolhida

Esta cantoneira tem uma altura H de 160 mm, um comprimento L e uma largura B de 80 mm e uma espessura S de 4mm.

No modelo numérico, a cantoneira é representada por uma mola de rotação, cuja rigidez foi calculado através do programa de cálculo Ftool. Para isso foi inserido no Ftool um modelo representativo do que se pretende analisar. Estando a cantoneira pregada, quando o elemento vertical, neste caso a parede, sofre uma deformação na direcção perpendicular ao seu plano por aplicação de cargas, a cantoneira tende a fletir, tal como se representa na figura 4.8.

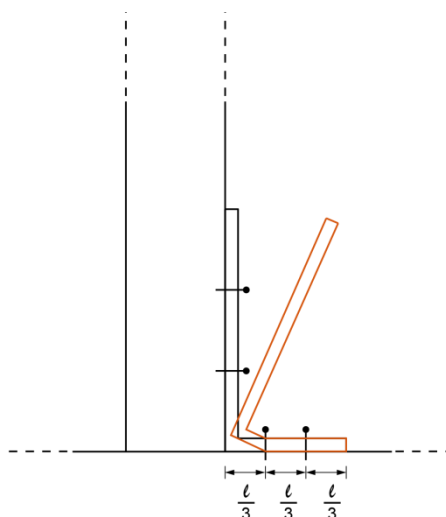


Fig.4.8 – Movimento realizado pela cantoneira

Posto isto, foi inserido no Ftool um modelo que procura retratar essa situação, reproduzindo a cantoneira com a redução do comprimento da sua aba inferior a um terço e a introdução de um encastramento nessa extremidade. A este modelo foram adicionadas as características do material e das dimensões da cantoneira seleccionado. Foi aplicada uma carga de 1000 kN/m na parede, tal como se pode observar na figura 4.9.

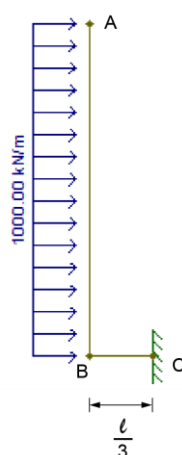


Fig.4.9 – Modelo da cantoneira no programa de cálculo Ftool

O propósito consistia, com recurso ao Ftool, na determinação da rigidez de rotação que a cantoneira é capaz de gerar quando sobre ela é aplicada uma carga distribuída horizontal. Assim, depois de calculada a estrutura, extraiu-se a rotação e o momento a que o nó B estava sujeito: $\phi=4,286$ rad e

$$M = 1000 \times 0,16 \times \frac{0,16}{2} = 12,8 \text{ kN.m} \quad (4.1)$$

Através da relação entre a rotação e o momento, determina-se o valor da rigidez equivalente, chegando-se a um resultado de 2,99 kNm/rad.

Optou-se por considerar seis cantoneiras por metro de parede (3 em cada face), ou seja três pares por metro. Esta opção traduz-se numa rigidez por metro de valor igual a $K=17,9$ kNm/rad/m. No entanto, a rigidez que interessa quantificar é a rigidez por apoio já que é esta que vai ser introduzida no programa de cálculo SAP2000. Deste modo, chega-se a uma rigidez por apoio de $K=17,9 \times 0,17=3,05$ kNm/rad. Posto isto, esta solução é simulada no programa de cálculo através da colocação de uma mola de rotação em cada apoio, superior e inferior, com uma rigidez de 3,05 kNm/rad na direcção x, direcção horizontal correspondente ao plano da parede.

Feita a apresentação e descrição do terceiro cenário, segue-se a descrição do quarto cenário. Neste, o lado esquerdo da parede é reforçado através da ligação da parede de tabique a outra que lhe é perpendicular. No que diz respeito ao programa de cálculo, este cenário corresponde, simplificada, ao modelo base com apoios triplos de translação ao longo de todos os pontos da tábuia do topo esquerdo. Note-se que neste cenário não se considera a rigidez à rotação que é potencialmente introduzida pelo sistema a utilizar na ligação das paredes.

Por último, o quinto cenário diz respeito ao mesmo tipo de intervenção do cenário anterior sendo que neste caso a intervenção é realizada nos dois topos da parede.

Os cenários atrás enunciados podem ser descritos da seguinte forma:

- Cenário 1: Modelo base com nó extremo esquerdo do frechal superior fixo na direcção vertical;
- Cenário 2: Modelo base com os nós extremos do frechal superior fixos na direcção vertical;
- Cenário 3: Modelo base com cantoneiras na ligação do frechais superior e inferior à base e ao topo;
- Cenário 4: Modelo base com ligação rotulada no topo esquerdo;
- Cenário 5: Modelo base com ligação rotulada nos topos esquerdo e direito.

São também apresentadas as tabelas 4.6 e 4.7 que ajudam a compreender a descrição dos cenários propostos e as condições que lhes estão associadas. As translações, ou rotações bloqueadas são indicadas nas tabelas com o número 1. Para o caso de estarem livres, são indicadas com o número 0.

Tabela 4.6 – Condições de fronteira respeitantes aos frechais inferior e superior

Frechal Inferior					Frechal Superior				Nó extremo Esq.	Nó extremo Dir.
	Ux	Uy	Uz	Rx (kNm/rad)	Ux	Uy	Uz	Rx(kNm/rad)	Uz	Uz
Cenário 1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0
Cenário 2	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1
Cenário 3	1	1	1	1 (3,05)	1	1	0	1 (3,05)	0	0
Cenário 4	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
Cenário 5	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0

Tabela 4.7 – Condições de fronteira respeitantes aos topos esquerdo e direito

Topo Esquerdo					Topo Direito			
	Ux	Uy	Uz	Rx	Ux	Uy	Uz	Rx
Cenário 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Cenário 2	0	0	0	0	0	0	0	0
Cenário 3	0	0	0	0	0	0	0	0
Cenário 4	1	1	1	0	0	0	0	0
Cenário 5	1	1	1	0	1	1	1	0

4.5.2. RESULTADOS

Definidas as condições de fronteira a aplicar aos modelos estudados, a análise prossegue com a determinação do valor da carga crítica associada a cada modelo, afectado da respectiva condição de fronteira. Os cálculos efetuados envolvem os quatro modelos, S,SA,SP e D, e a informação relativa às combinações de análise propostas está organizada na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Modelos analisados

Parede simples			Parede dupla
Modelo S	Modelo SA	Modelo SP	Modelo D
S-1	SA-1	SP-1	D-1
S-2	SA-2	SP-2	D-2
S-3	SA-3	SP-3	D-3
S-4	SA-4	SP-4	D-4
S-5	SA-5	SP-5	D-5

O estudo inicia-se com a apresentação do modelo S-1 cuja configuração de deformada está apresentada na figura 4.10.

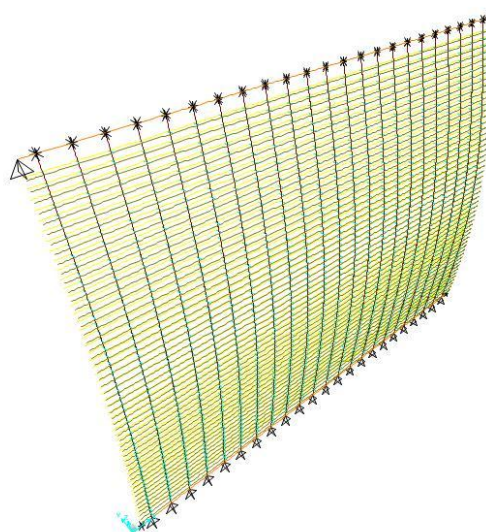


Fig.4.10 – Modelo S-1

Este modelo tem o nó extremo esquerdo do frechal superior restringido na direcção vertical z , sendo que esta restrição se traduz num incremento reduzido (2,4%) do valor da carga crítica que apresenta o valor de $p_{cr}=47,5$ kN/m. Observa-se ainda que as tábuas que estão próximas do nó que foi bloqueado experimentam no modo de encurvadura uma curvatura menos saliente do que as do lado oposto à intervenção referida, sendo forçadas a fletir pelo fasquio que as liga e tende a uniformizar o comportamento da parede.

Seguidamente, na figura 4.11 é apresentada a configuração da deformada da estrutura da parede, correspondente, tal como no modelo anterior, ao primeiro modo de encurvadura, desta vez com os dois nós extremos fixos.

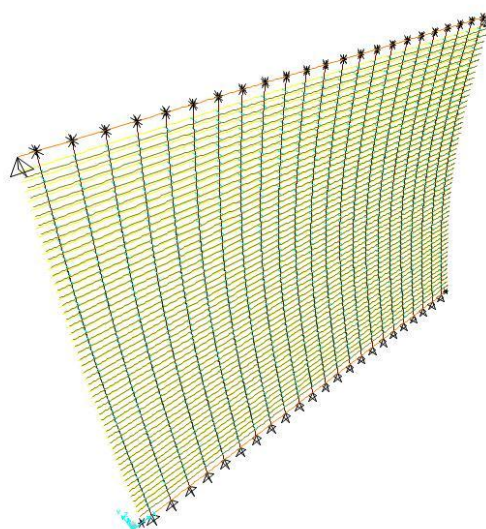


Fig.4.11 – Modelo S-2

Este modelo assume a designação de S-2 e o valor da carga crítica correspondente é $p_{cr}=49,4$ kN/m. Atesta-se uma vez mais que a diferença encontrada no valor da carga crítica relativamente ao modelo base é reduzida (6,5%), não introduzindo melhorias significativas a nível estrutural.

O modelo que considera a introdução da cantoneira assume a designação de S-3 e a configuração da deformada do primeiro modo de encurvadura é apresentada na figura 4.12.

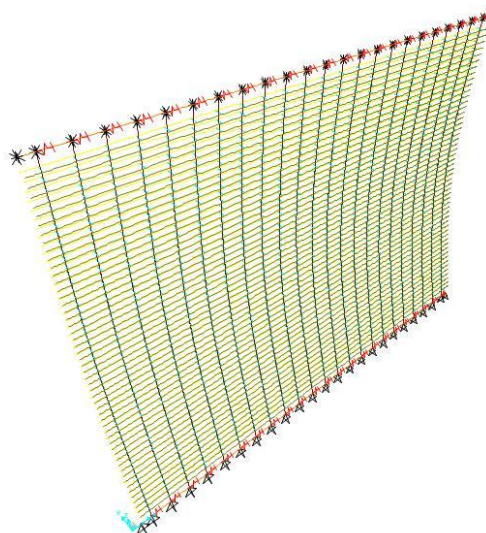


Fig.4.12 – Modelo S-3

Para este caso, a carga crítica uniformemente distribuída assume o valor de $p_{cr}=64,0$ kN/m, verificando-se uma melhoria de 37,9 % em relação ao valor do modelo S-base. As tábuas encurvam com dupla curvatura como resultado da restrição da rotação imposta aos frechais.

Ainda referente à consideração de diferentes condições de fronteira, na figura 4.13 é apresentado o modelo S-4.

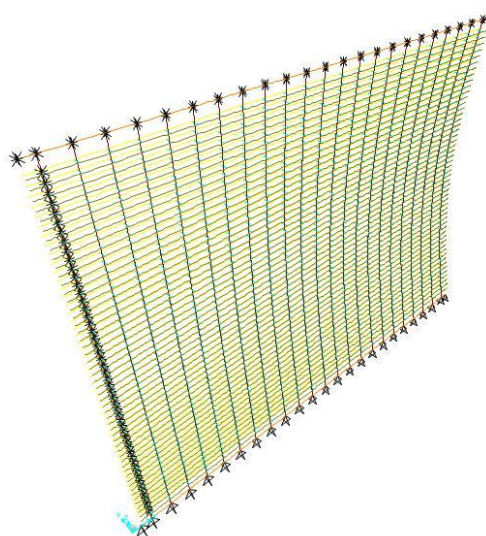


Fig.4.13 – Modelo S-4

Para este modelo, a parede encurva do lado não restringido e para uma carga crítica de $p_{cr}=54,1$ kN/m, ocorrendo uma melhoria, mas ainda pouco expressiva (16,6%).

Por último, na figura 4.14 é apresentado o modelo S-5.

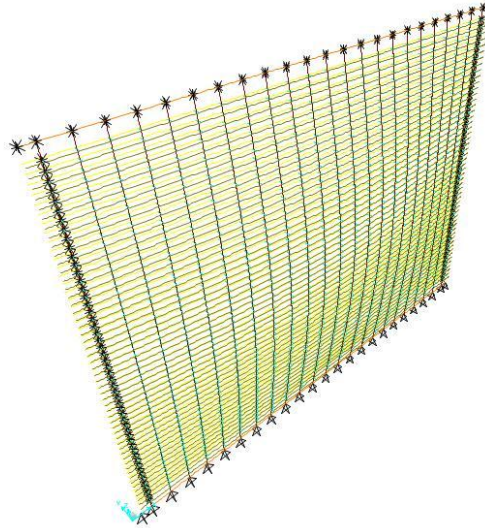


Fig.4.14 – Modelo S-5

A configuração da deformada do modo de encurvadura para este caso é marcada pela deformação da zona central da parede, que resulta do fato de esta se encontrar rotulada em ambos os topos que, neste caso funcionam como charneira. Verifica-se também que a ligação da parede de tabique às paredes nos seus topos laterais é bastante benéfica do ponto de vista estrutural, conferindo uma maior resistência à parede. O valor da carga crítica para este caso é $p_{cr}=113,9$ kN/m, obtendo-se uma melhoria de 145,5 %, em relação ao modelo base.

Depois de analisado o modelo S, a mesma análise é agora repetida para o modelo SA. Os resultados, para os casos estudados são apresentados na tabela 4.9. Observa-se que as configurações das deformadas dos modos de encurvadura destes modelos são idênticas às do modelo S com as mesmas condições de fronteira, não sendo por isso apresentadas.

Tabela 4.9 – Carga crítica de encurvadura - Modelo SA

Modelo	Carga de encurvadura (kN/m)
SA-1	48,3
SA-2	51,0
SA-3	67,5
SA-4	57,8
SA-5	139,8

Para o modelo SA-1 a parede assume uma deformada idêntica à do modelo SA-base, sendo o valor da carga crítica bastante semelhante, $p_{cr}=48,3$ kN/m. Este fato evidencia que a fixação deste nó não

parece beneficiar estruturalmente a parede de tabique. Observa-se ainda que o valor obtido é também bastante idêntico ao valor associado ao modelo S-1.

Para o modelo seguinte, que fixa os dois nós extremos superiores, a carga crítica assume o valor de $p_{cr}=51,0$ kN/m, valor muito próximo do que foi obtido para o modelo S-2, concluindo-se que para este modelo esta condição também não tem uma interferência significativa no comportamento estrutural da parede de tabique.

Para o caso em que é introduzida a cantoneira, verifica-se um valor da carga crítica uniformemente distribuída igual a $p_{cr}=67,5$ kN/m. Este resultado, também muito semelhante ao resultado associado ao modelo S-3, permite concluir que a introdução das cantoneiras se traduz num aumento relevante da capacidade resistente das paredes, visto que corresponde a um incremento de 45,5% no valor da carga crítica.

Relativamente ao modelo SA-4, a configuração da deformada do modo de encurvadura é marcada por uma curvatura muito ligeira da zona que está associada ao lado restringido, enquanto no lado em que a parede continua livre a deformada é idêntica à dos modelos já apresentados, com uma tendência cada vez mais acentuada para voltar à posição original à medida que se caminha da zona livre para a zona impedida, ou seja, da direita para a esquerda. Esse fato resulta, mais uma vez, da contribuição do fasquio que obriga as tábuas a deformarem-se no modo de encurvadura de forma contínua. Esta situação traduz-se num valor da carga crítica de $p_{cr}=57,8$ kN/m, obtendo-se um valor muito próximo do valor obtido no modelo S.

O último modelo assume a designação de SA-5 e o valor da carga crítica correspondente é $p_{cr}=139,8$ kN/m. Verifica-se que este valor é superior ao valor associado ao modelo S-5. Isto acontece porque para o modelo SA-5 a ligação do fasquio à tábua é centrada e rígida, e por isso a ligação rotulada dos topos da parede é feita simultaneamente nas tábuas e no fasquio. Para este caso ocorre uma melhoria de 201,3% do valor da carga crítica em relação ao modelo SA-base.

Relativamente ao modelo com abertura, a primeira análise corresponde ao modelo com a condição de fronteira que bloqueia o nó extremo esquerdo. A configuração de deformada é apresentada na figura 4.15.

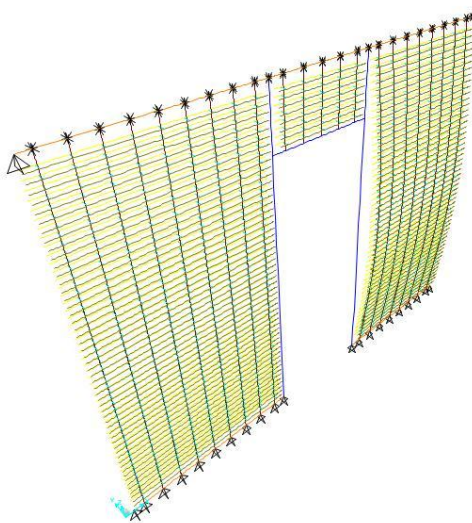


Fig.4.15 – Modelo SP-1

A consideração desta condição de fronteira, como se percebe pela observação da figura 4.15, não altera o modo de encurvadura relativamente ao modelo base. A zona da parede afetada por este fenómeno continua a ser a que se situa do lado direito da porta, embora se verifique um pequeno incremento do valor da carga crítica para $p_{cr}=39,8$ kN/m. A diferença de valores é mínima, (2,8%), significando portanto que não condiciona o comportamento da parede em causa.

Prossegue-se com a apresentação do modelo SP-2 que acrescenta, ao modelo anterior, a restrição do nó extremo do lado direito. Assim, a figura 4.16 corresponde ao cenário em que a parede tem os seus dois nós extremos fixos, verificando-se que o primeiro modo de encurvadura da parede corresponde a uma configuração deformada em que apenas as tábuas que se situam à esquerda da porta sofrem uma deformação, assumindo a carga crítica o valor $p_{cr}=43,6$ kN/m.

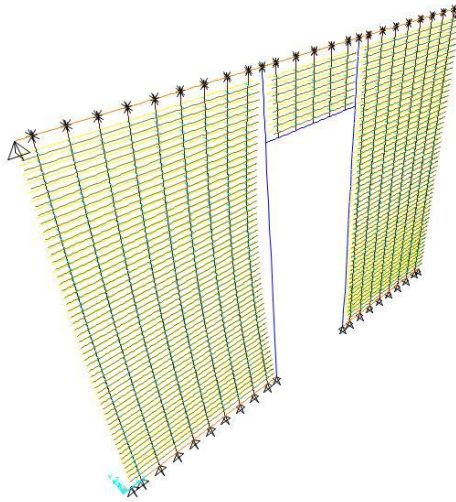


Fig.4.16 – Modelo SP-2 (1º modo de encurvadura)

A título de curiosidade, para o segundo modo, com uma carga crítica ligeiramente mais alta, $p_{cr}=43,7$ kN/m, a parede experimenta encurvadura do outro lado sendo a configuração da sua deformada apresentada na figura 4.17. A consideração desta condição de fronteira não introduziu melhorias significativas no comportamento da parede.

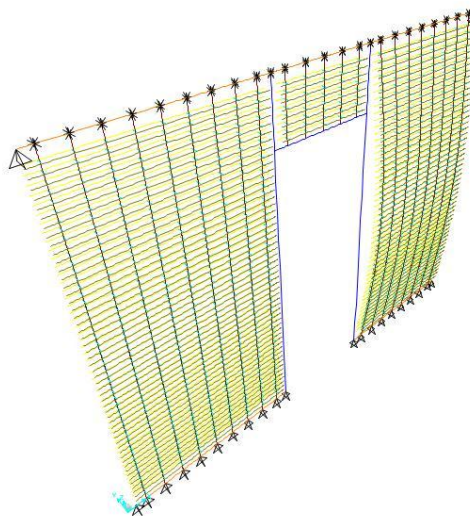


Fig.4.17 – Modelo SP-2 (2º modo de encurvadura)

A análise seguinte trata a solução de reforço correspondente à introdução de cantoneiras na base e no topo da parede de tabique. Este modelo é designado por SP-3 e a configuração da deformada do modo de encurvadura está representada na figura 4.18.

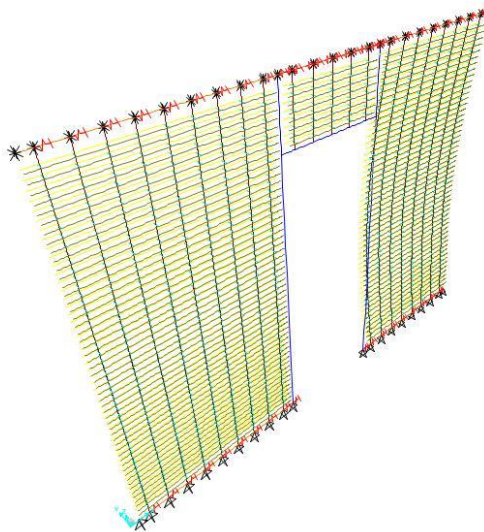


Fig.4.18 – Modelo SP-3

No que diz respeito a este modelo, a deformada do modo de encurvadura da parede não experimenta modificações visíveis, verificando-se, com um olhar mais atento, que as tábuas apresentam uma deformada com dupla curvatura. Esse fato traduz-se também no aumento significativo da carga crítica, que assume o valor de $p_{cr}=56,1$ kN/m, ou seja mais 45% em relação ao modelo base.

Avalia-se agora o comportamento da parede SP quando se encontra ligada a uma outra parede numa das suas extremidades. A configuração da deformada do modo de encurvadura é apresentada na figura 4.19.

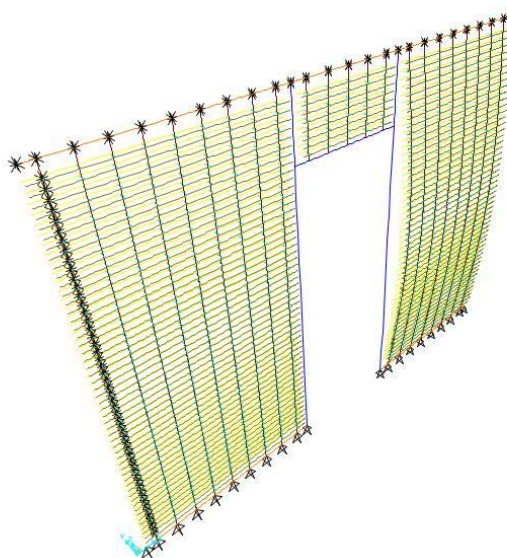


Fig.4.19 – Modelo SP-4

Para este caso, verifica-se que o valor da carga crítica uniformemente distribuída é $p_{cr}=38,7$ kN/m. O valor da carga crítica é igual ao valor do modelo SP-base, sendo que esta igualdade de valores resulta do modo de encurvadura associado a este modelo que faz, tal como no primeiro, mover apenas o lado direito da parede. Posto isto, constata-se que esta condição de fronteira não tem interferência na capacidade resistente da parede.

Por último, é apresentado o modelo SP-5. A configuração da deformada do modelo referido é apresentada na figura 4.20, constatando-se que a parede encurva na sua zona central, devido ao fato de estar bloqueada nas suas duas extremidades.

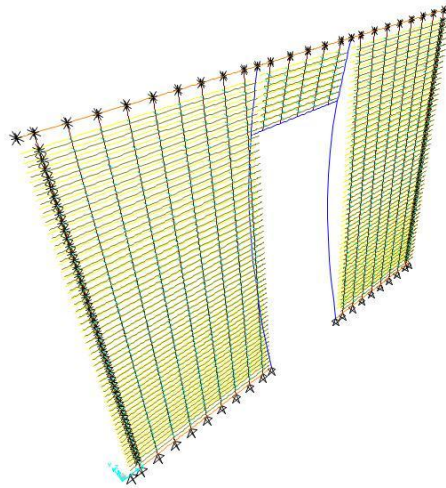


Fig.4.20 – Modelo SP-5

A encurvadura ocorre sobre a estrutura definida pelos prumos; as tábuas verticais permanecem na posição inicial, uma vez que estas e os prumos que delimitam a porta se encontram desligados entre si. Note-se que esta situação ocorre habitualmente em paredes de tabique reais. O valor da carga crítica para este caso é de $p_{cr}=65,7$ kN/m, verificando-se um incremento de 69,8% quando comparado com o valor associado ao modelo base.

A apresentação dos resultados obtidos por aplicação das condições de fronteira definidas termina com a análise do modelo D que simula uma parede de tabique dupla. Na figura 4.21 é apresentada a configuração da deformada do primeiro modo de encurvadura da parede, com o nó extremo esquerdo fixo.

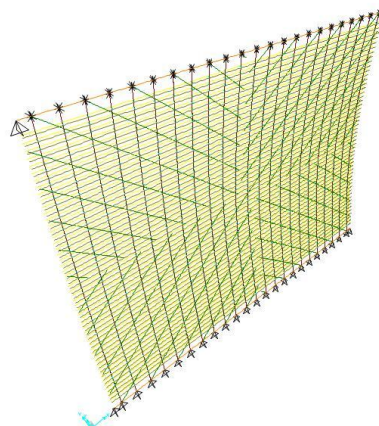


Fig.4.21 – Modelo D-1

A parede apresenta uma deformada para o modo de encurvadura semelhante à do modelo D-base, sendo o valor da carga crítica uniformemente distribuída também idêntico, $p_{cr}=8,7$ kN/m. Este resultado mostra que a fixação deste nó não parece favorecer estruturalmente a parede de tabique.

A deformada seguinte abrange, não só a fixação do nó extremo esquerdo do frechal superior, como também a fixação do seu nó extremo direito, e é apresentada na figura 4.22.

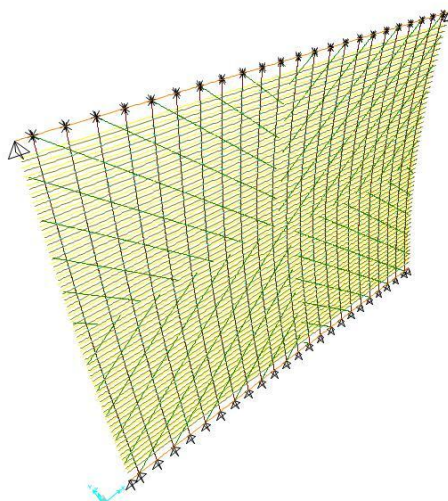


Fig.4.22 – Modelo D-2

A carga crítica uniformemente distribuída assume, para este caso, o valor de $p_{cr}=10,4$ kN/m verificando-se um incremento (33,3%). A adoção desta condição de fronteira tem uma interferência estrutural significativa no comportamento da parede de tabique.

A configuração da deformada associada ao emprego de cantoneiras na ligação da base e do topo da parede é apresentada na figura 4.23.

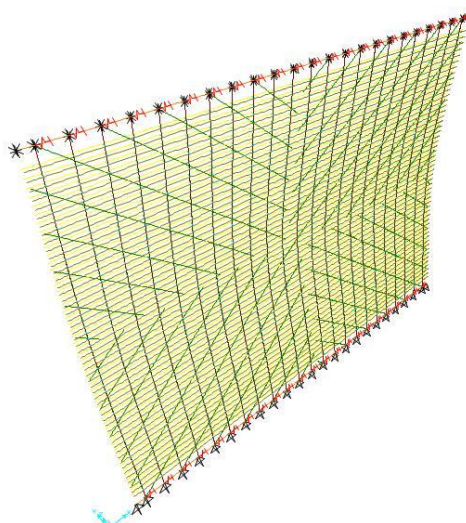


Fig.4.23 – Modelo D-3

Confirma-se também nesta figura que o fenómeno de encurvadura movimenta todas as tábuas verticais em torno do seu eixo de menor inércia, no mesmo sentido e ao mesmo tempo, sendo que as tábuas diagonais acompanham o seu movimento. Neste caso verifica-se que o valor da carga crítica

uniformemente distribuída assume o valor de $p_{cr}=20,0$ kN/m, aumentando 156,4 % em relação ao valor base. Este resultado evidencia que a introdução das cantoneiras materializa uma solução que provoca um aumento significativo do valor da carga crítica, ou seja da capacidade resistente da parede.

Relativamente ao modelo D-4, a configuração da deformada do modo de encurvadura é apresentada na figura 4.24.

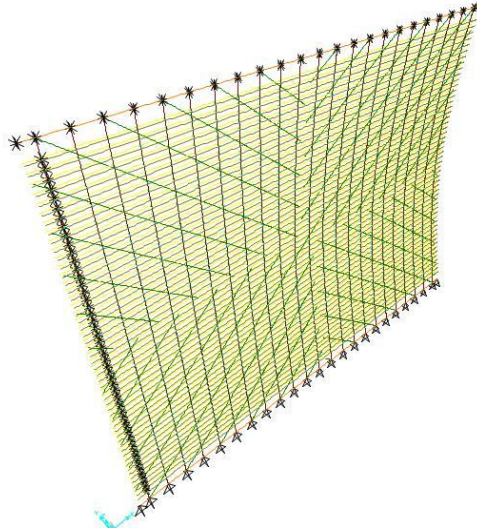


Fig.4.24 – Modelo D-4

A configuração apresentada é marcada por uma curvatura muito ligeira na zona do lado restringido, enquanto do lado em que a parede continua livre a deformada é semelhante à dos modelos já apresentados. Verifica-se que a solução anterior, associada ao modelo D-3 ($p_{cr}=20,0$ kN/m), beneficia muito mais a parede, obtendo-se um valor da carga crítica de encurvadura maior do que neste caso ($p_{cr}=10,9$ kN/m) em que a solução adotada está associada a uma restrição numa zona mais localizada.

A última condição de fronteira diz respeito ao cenário em que a parede de tabique está rotulada nos dois topos, correspondendo à situação em que esta se liga lateralmente a paredes de alvenaria ou de madeira. Este modelo é designado por D-5 e a sua configuração da deformada é apresentada na figura 4.25.

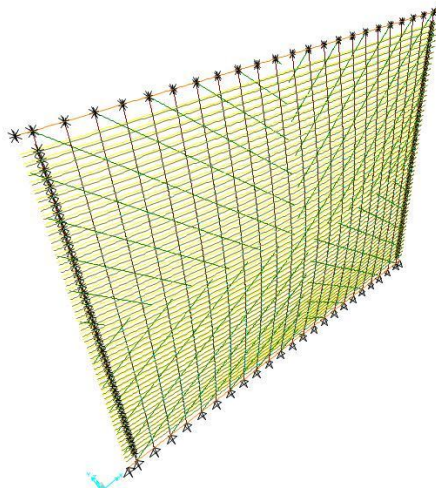


Fig.4.25 – Modelo D-5

Devido ao fato de estar ligada em ambos os topos, a parede apenas se deforma na região central, vendo também o valor da sua carga crítica bastante incrementado relativamente ao modelo D-base. Verifica-se que a ligação desta parede a outras nos topos traz benefícios para a sua capacidade resistente, já que a carga crítica assume um valor de $p_{cr}=29,0$ kN/m, ocorrendo um aumento de 271,8% em relação ao modelo D-base.

4.6. ANÁLISE COMPARATIVA

Organiza-se agora na tabela 4.10 os valores para a carga crítica de cada um dos modelos analisados.

Tabela 4.10 – Carga crítica de encurvadura - Modelo S, SA, SP e D

Carga de encurvadura (kN/m)					
Parede simples			Parede dupla		
	Modelo S	Modelo SA	Modelo SP	Modelo D	
Cenários	Base	46,4	46,4	38,7	7,8
	1	47,5	48,3	39,8	8,7
	2	49,4	51,0	43,6	10,4
	3	64,0	67,5	56,1	20,0
	4	54,1	57,8	38,7	10,9
	5	113,9	139,8	65,7	29,0

Numa primeira análise, percebe-se que o tipo de parede de tabuado duplo é bastante mais instável que a parede constituída por tábuas simples com espessura total idêntica. Embora o conjunto de tábuas verticais e diagonais, para a parede dupla totalize a mesma espessura da parede que tem apenas uma tábua, ou seja a mesma quantidade de material, verifica-se que as tábuas diagonais contribuem pouco para a resistência à encurvadura da parede.

Olhando agora para os resultados do modelo SA, percebe-se que a consideração na simulação do fasquio ligado de forma continua às várias tábuas é uma boa simplificação para representar um modelo de uma parede de tabique simples, visto que os resultados para este modelo e para o modelo S-base são os mesmos quando são admitidos os vários cenários de condições de fronteira. Excetua-se apenas o modelo com rótula nos topos esquerdo e direito, cujo valor da carga crítica experimenta uma subida de 22,7% em relação ao modelo S-5.

A parede com abertura assume um comportamento diferente das restantes. As configurações das deformadas dos modos de encurvadura para todos os modelos movimentam apenas as tábuas de um dos lados da abertura, ou apenas os prumos, sendo as cargas críticas correspondentes inferiores às dos modelos associados à parede sem abertura.

Relativamente às condições de fronteira, para os modelos S, SA e D constata-se que o comportamento da parede melhora com a seguinte ordem de aplicação: Cenário 1 – Cenário 2 – Cenário 4 – Cenário 3 – Cenário 5. Para o modelo SP, o cenário 4 não introduz melhorias, já que apresenta o mesmo valor do modelo SP-base.

5

REFORÇO

5.1. OBJETIVOS

Os objectivos deste capítulo são:

- Analisar possibilidades de intervenções de reforço a aplicar em parede de tabique;
- Simular numericamente o comportamento à encurvadura de paredes de tabique reforçadas com elementos de aço;
- Simular numericamente o comportamento à encurvadura de paredes de tabique reforçadas com elementos de madeira;

5.2. AÇÕES DE REFORÇO

A intervenção em edifícios antigos pode realizar-se a diversos níveis. Neste Capítulo irá discutir-se o reforço de paredes de tabique, prevendo-se ações que melhorem o seu desempenho e com isso o desempenho global do edifício. Assim, é proposto um conjunto de operações destinadas a aumentar a capacidade resistente destas paredes, evitando a necessidade da sua demolição. Deste modo, são propostos quatro cenários de reforço que incluem o aço e a madeira por se tratar de materiais compatíveis com os casos em análise.

5.2.1. REFORÇO EM AÇO

A primeira acção de reforço proposta diz respeito à introdução de chapas metálicas e considera duas opções de colocação. A primeira é designada por RA (abreviatura para Reforço de Aço) e corresponde à aplicação de uma chapa metálica com uma largura de 6 cm e uma espessura de 3 mm. O material que a constitui é um aço S235, com um módulo de elasticidade de 210 GPa. A introdução destas chapas implica retirar o reboco e o fasquio, bem como os pregos que possibilitam a sua ligação às tábuas verticais. A parede passa a ser constituída pelas tábuas de madeira verticais, cujas características já foram descritas anteriormente, e pelas chapas metálicas com as propriedades mecânicas descritas na tabela 5.2, aplicadas apenas de um dos lados da parede. A colocação das chapas é feita em forma de cruz de Sto. André: duas chapas colocadas na diagonal e que percorrem toda a parede, e mais duas chapas centradas, uma colocada na horizontal, ao longo de todo o comprimento da parede, e outra na vertical, abarcando toda a sua altura. Os elementos de reforço envolvidos são expostos na tabela 5.1 em que ‘L’ representa a largura da chapa, ‘e’ a espessura da chapa e ‘E’ o módulo de elasticidade do material que constitui a chapa.

Tabela 5.1 – Dimensões e módulos de elasticidade da fita de reforço

Fita metálica de reforço	
L (m)	= 0.06
e (m)	= 0.003
E (GPa)	= 210

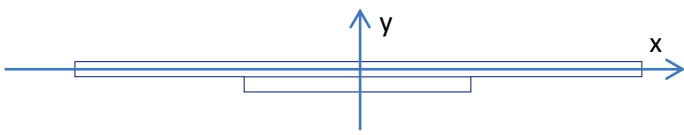
O segundo cenário de reforço em aço, RAV (abreviatura para Reforço de Aço Vertical) acrescenta ao cenário anterior (RA) um reforço suplementar, que consiste na adição de chapas verticais aos quartos do vão. A sua colocação dá origem a uma distribuição de elementos de reforço mais homogénea, colmatando zonas laterais menos reforçadas.

Assim, tem-se que:

- RA: Reforço com chapas metálicas (L=0,06; e=0,003) em cruz de Sto. André;
- RAV: Reforço RA complementado aos quartos do vão com chapas metálicas verticais.

Na tabela 5.2 apresentam-se as propriedades geométricas relativas à seção transversal da chapa metálica.

Tabela 5.2 – Propriedades geométricas do sistema de reforço com fitas de aço

Centro de gravidade da tábua com fita de reforço de um lado em relação ao centro da tábua existente	
YG = -8.853E-03 m	
Inércia da fita em relação ao eixo paralelo ao eixo x que passa no centro de gravidade anterior	
IxG = 2.893E-08 m ⁴	
IyG = 5.400E-08 m ⁴	
A = 1.800E-04m ²	

5.2.1.1. Resultados

As acções de reforço RA e RAV são aplicadas a cada um dos modelos definidos nos Capítulos 3 e 4, sendo executadas não só sobre o modelo base, mas também sobre os modelos afectados pelos vários cenários de condições de fronteira, de maneira a ter uma combinação de resultados que permita perceber a melhoria que é introduzida na estrutura quando é tida em conta esta ação conjunta. Uma vez que os resultados relativos às condições de fronteira respeitantes aos cenários 1 e 2 não introduzem melhorias no comportamento da parede, estes não são considerados nesta análise.

Estas opções de reforço, destinadas a melhorar o comportamento à encurvadura das paredes estudadas, implicam a remoção do fasquiado de modo a permitir o contato direto dos elementos de reforço com os elementos verticais (tábuas). Esta remoção poderá ser pontual, no entanto foi aqui considerada como total. Note-se que o fasquio, tal como foi visto até aqui, tem como função primordial garantir a

continuidade da deformada da parede, permitindo que encurve como se de um só elemento se tratasse, evitando que as tábuas instabilizem de maneira isolada.

Assim, após a remoção das ripas, a estrutura sobranete, formada pelas tábuas e pelos frechais superior e inferior que constituem a parede, é exactamente a mesma para os modelos S e SA; o conjunto de combinações associadas ao modelo SA coincidem com o do modelo S. Consequentemente, o conjunto de resultados obtidos para os modelos afectados das soluções de reforço RA, RAV são os mesmos, para o modelo S e para o modelo SA, considerando-se nesta análise apenas o modelo S. Relativamente ao modelo SP, apenas é considerado o reforço RA, já que os elementos de parede que ladeiam a porta (nembos) não apresentam dimensão suficiente para justificar a introdução dos reforços suplementares aos quartos.

Face ao exposto, os modelos analisados para o comportamento a acções verticais são apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Modelos analisados

Parede simples						Parede dupla	
Modelo S		Modelo SA		Modelo SP		Modelo D	
S-RA	S-RAV	-	-	SP-RA	-	D-RA	D-RAV
S-3-RA	S-3-RAV	-	-	SP-3-RA	-	D-3-RA	D-3-RAV
S-3-RA	S-4-RAV	-	-	SP-4-RA	-	D-4-RA	D-4-RAV
S-3-RA	S-5-RAV	-	-	SP-5-RA	-	D-5-RA	D-5-RAV

O estudo destes modelos inicia-se com a apresentação das configurações da deformada dos modos de encurvadura para os modelos S-RA e S-RAV, ilustrados na figura 5.1.

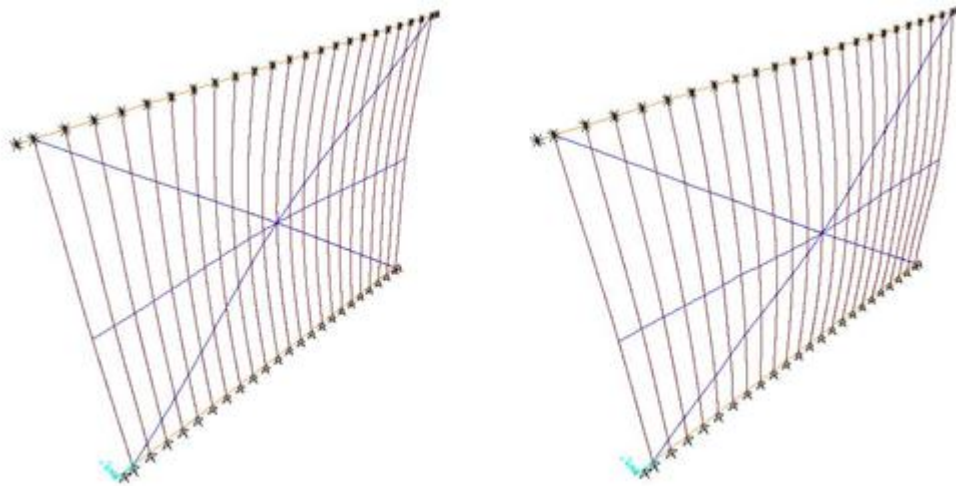


Fig.5.1. – Modelos S-RA e S-RAV

No primeiro caso verifica-se que o valor da carga crítica uniformemente distribuída é de, $p_{cr}=85,3$ kN/m. Isto indica que a inclusão deste reforço beneficiou estruturalmente a parede de tabique, traduzindo-se num incremento de 83,8 % no valor da carga crítica em relação ao modelo S-base, configurando-se como uma medida de reforço bastante interessante.

Para o caso do modelo S-RAV, a carga crítica uniformemente distribuída assume o valor de $p_{cr}=132,5\text{kN/m}$. A colocação destas chapas favorece a parede de tabique em termos estruturais e nota-se uma melhoria bastante significativa (55,3%) quando comparada com a parede que foi sujeita ao reforço RA. Relativamente ao modelo S-base, verifica-se um incremento de 185,6 %.

Seguidamente, a combinação apresentada diz respeito ao reforço da parede com as chapas conciliada com a aplicação da cantoneira na base e no topo da parede de tabique. A configuração da deformada dos modos de encurvadura para os modelos S-3-RA e S-3-RAV é apresentada na figura 5.2.

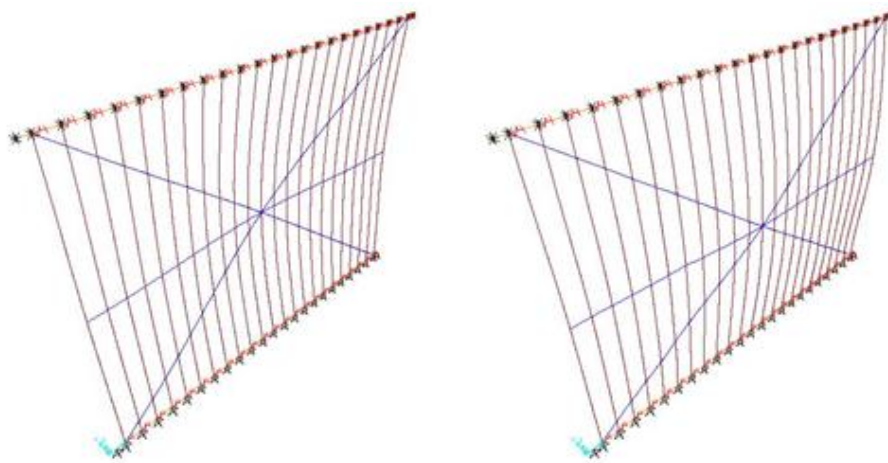


Fig.5.2 – Modelos S-3-RA e S-3-RAV

Como era de prever, o valor da carga crítica correspondente ao modelo S-3-RA, $p_{cr}=106,9\text{ kN/m}$ é maior que o do modelo anterior, S-RA. A parede, além da intervenção relativa às chapas, viu o seu desempenho melhorado pela colocação de um reforço extra. Este reforço traduz-se num aumento de 130,4 % em relação ao modelo S-base. A acção conjunta da segunda opção de colocação das chapas (RAV) e das cantoneiras confere à parede melhorias significativas, obtendo-se um valor de carga crítica de $p_{cr}=155,5\text{kN/m}$ que, em termos percentuais, se traduz num aumento de 235,1 % em relação ao modelo S-base, e de 45,5 % em relação ao modelo S-3-RA.

Para os casos em que a parede se apresenta ligada a uma outra num dos topos laterais, combinada com a inclusão das chapas metálicas as configurações de deformada dos modos de encurvadura são apresentadas na figura 5.3.

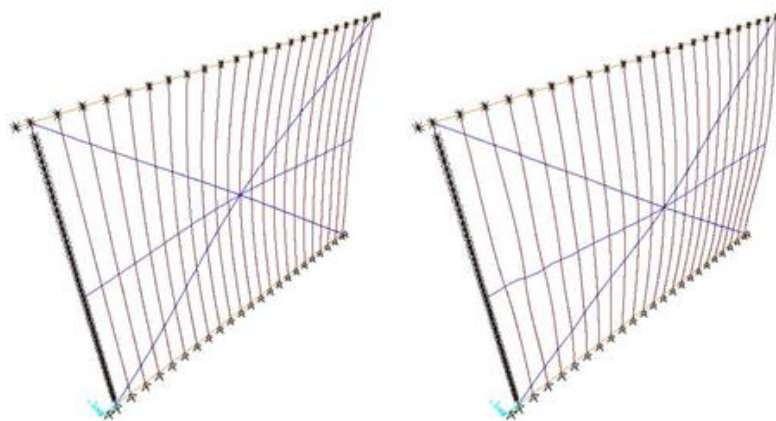


Fig.5.3 – Modelos S-4-RA e S-4-RAV

A carga de encurvadura admissível para o modelo S-4-RA, $p_{cr}=88,7$ kN/m, é semelhante à do modelo S-RA, evidenciando que a parede rotulada num topo, assume um comportamento idêntico nas duas soluções de reforço com chapas, apresentado o mesmo valor de carga crítica; o reforço aos quartos introduz grandes melhorias no comportamento da parede. Para o modelo S-4-RAV, o valor da carga crítica é $p_{cr}=139,0$ kN/m, o que significa um aumento de 199,6% relativamente ao modelo S-base e de 65,6% em relação ao modelo RA.

Por fim, são apresentados os modelos S-5-RA e S-5-RAV, na figura 5.4.

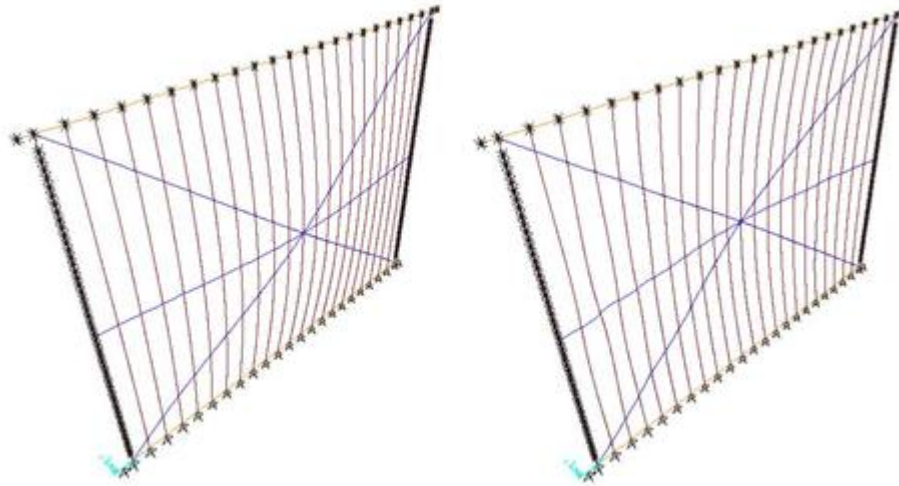


Fig.5.4 – Modelo S-5-RA e S-5-RAV

Para o primeiro modelo, a carga crítica é de $p_{cr}=97,7$ kN/m, aumentando 110,6% em relação ao modelo S-base, verificando-se um aumento expressivo no modelo S-5-RAV para um valor de $p_{cr}=161,2$ kN/m, representando um aumento de 247,4% em relação ao valor do modelo S-base.

Apresenta-se a seguir, o mesmo conjunto de resultados, decorrentes da aplicação dos reforços definidos, para o modelo SP. A análise inicia-se com a apresentação, na figura 5.5 da configuração da deformada do modo de encurvadura do modelo base reforçado.

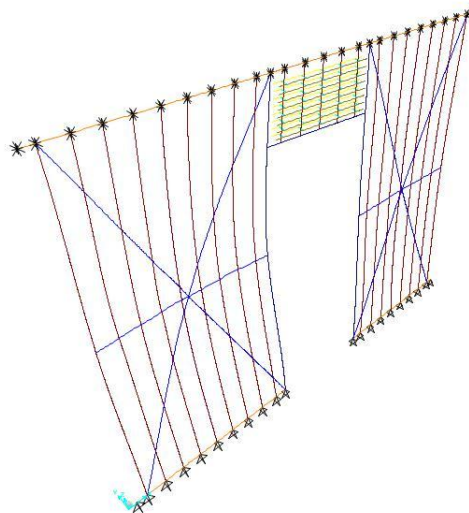


Fig.5.5 – Modelo SP-RA

A colocação da chapa é feita nos dois panos de parede existentes laterais à abertura, verificando-se que o lado da parede a sofrer encurvadura é o lado esquerdo. A introdução deste reforço altera o pano de parede que sofre deformação, relativamente ao modelo base. O valor que se obtém para a carga crítica é $p_{cr}=92,9$ kN/m, correspondendo ao primeiro modo de encurvadura. A aplicação deste reforço origina uma subida do valor da carga crítica de 140,1% em relação ao modelo SP-base.

O caso que se segue, apresentado na figura 5.6, corresponde ao modelo SP-3-RA, que concilia a aplicação das chapas metálicas com as cantoneiras na base e no topo.

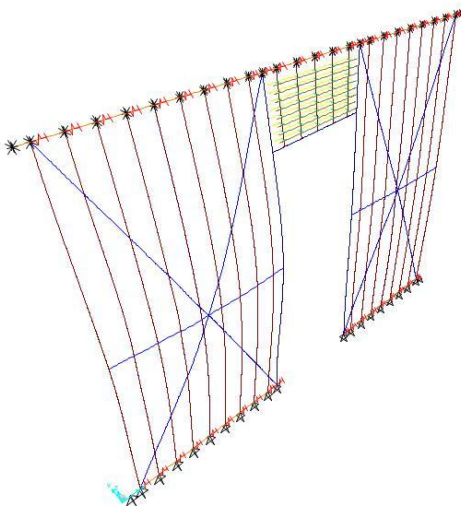


Fig.5.6 –Modelo SP-3-RA

Pode verificar-se que o modo de encurvadura da parede corresponde a uma configuração da deformada idêntica à anterior, englobando as tábuas localizadas à esquerda da abertura. A respetiva carga crítica uniformemente distribuída é $p_{cr}=108,6$ kN/m; constata-se que a introdução das cantoneiras introduziu melhorias no comportamento à encurvadura da parede, aumentando o valor da carga crítica de 180,6% em relação ao valor que se obtém para o modelo SP base.

Seguidamente, introduz-se na parede a condição de fronteira correspondente ao seu travamento lateral apenas num dos topos, cuja deformada do modo de encurvadura se representa na figura 5.7.

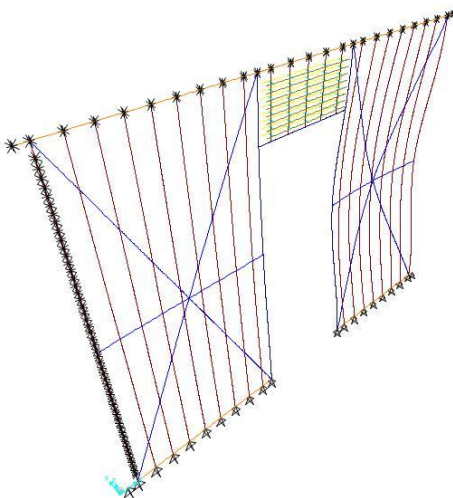


Fig.5.7 – Modelo SP-4-RA

A zona envolvida no modo de encurvadura é apenas a que se encontra à direita da abertura. A configuração da deformada associada a este caso diz respeito ao primeiro modo de encurvadura, cuja carga crítica uniformemente distribuída é $p_{cr}=115,9 \text{ kN/m}$, correspondendo a um aumento de 199,5 % do valor da carga crítica relativamente ao modelo SP-base.

Por fim, no que toca a este tipo de reforço, tem-se o modelo SP-5-RA cuja configuração de deformada se apresenta na figura 5.8

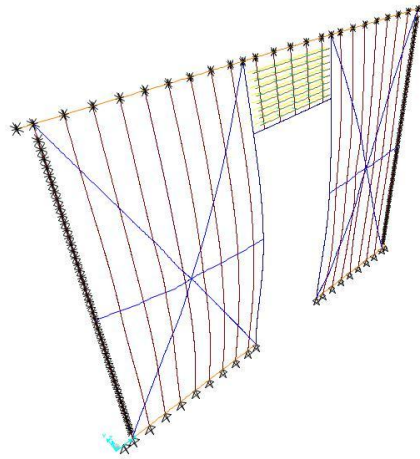


Fig.5.8 – Modelo SP-5-RA

As intervenções realizadas neste caso apresentam-se como bastante benéficas do ponto de vista estrutural para a parede de tabique, uma vez que este reforço possibilita a ligação de todos os elementos envolvidos, nomeadamente das tábuas aos prumos das portas, o que se traduz numa melhoria bastante significativa do comportamento da parede. Neste caso as tábuas mais afetadas localizam-se perto da abertura. Observa-se ainda que o lado da parede mais afectado é o esquerdo. Para este modelo obtém-se o valor da carga crítica de $p_{cr}=156,1 \text{ kN/m}$, aumentando de 303,4%, em relação ao modelo SP-base.

Para finalizar o estudo relativo ao reforço em aço, são apresentados os resultados que dizem respeito ao modelo D. Na figura 5.10 são apresentadas as configurações da deformada dos modos de encurvadura para os modelos D-RA e D-RAV, respetivamente, sendo que os modos de encurvadura de todos os modelos D em que é aplicado o reforço RAV e nalguns onde é aplicado o reforço RA correspondem ao segundo modo de encurvadura, uma vez que o primeiro modo é um modo localizado que dificilmente será ativado. A título exemplificativo mostra-se na figura 5.9 um modo local, que neste caso corresponde ao primeiro modo de encurvadura do modelo D-RAV. Como já foi visto anteriormente, a introdução das chapas metálicas implica a remoção do fasquiado.

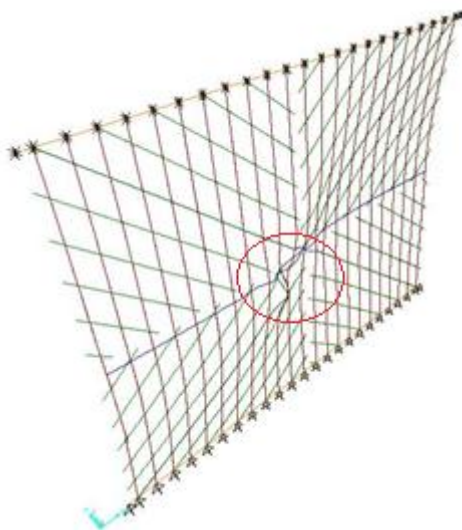


Fig.5.9 – Modelo D-RAV – modo local

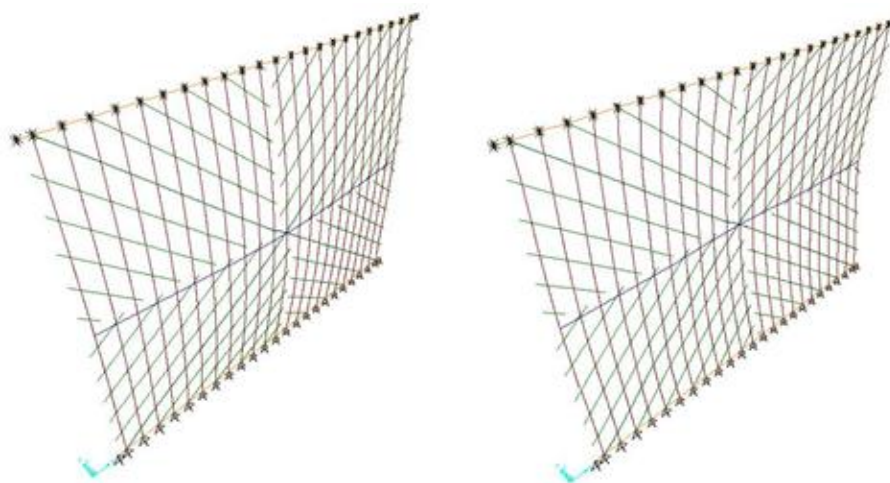


Fig.5.10 – Modelos D-RA e D-RAV (modo 2)

No primeiro caso de reforço (RA) verifica-se que o valor da carga crítica uniformemente distribuída é de, $p_{cr}=19,7$ kN/m, indicando que a inclusão deste reforço beneficiou estruturalmente a parede de tabique. Verifica-se também que o valor da carga crítica é sensivelmente igual à estimada no modelo numérico D-3, traduzindo-se num aumento de 152,6% relativamente ao modelo D-base.

Para o segundo caso de reforço (RAV), a carga crítica uniformemente distribuída assume o valor de $p_{cr}=63,0$ kN/m constatando-se que o emprego das chapas verticais nos quartos de vão beneficia bastante a parede de tabique em termos estruturais. Nota-se uma melhoria de 219,8% do valor da carga crítica relativamente à parede que foi sujeita ao reforço RA, e de 707,7% quando comparada com o modelo D-base.

Seguidamente, as combinações apresentadas na figura 5.11 dizem respeito ao reforço da parede conciliado com a aplicação das cantoneiras na base e no topo.

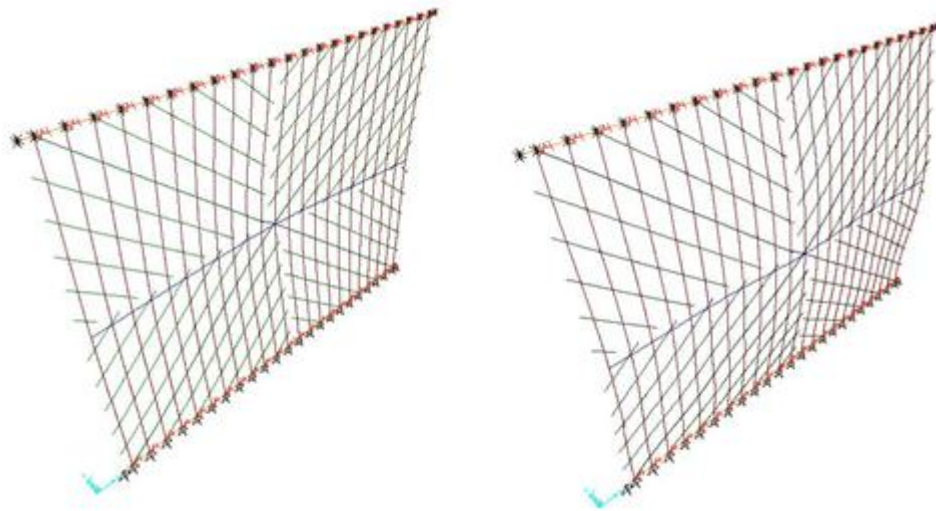


Fig.5.11– Modelos D-3-RA (modo 2) e D-3-RAV (modo 2)

Para o primeiro modelo, o valor da carga crítica, $p_{cr}=33,7$ kN/m, corresponde ao segundo modo de encurvadura e constata-se uma subida de 332,1% do valor da carga, relativamente ao modelo D-base. Para o modelo D-3-RAV, a introdução das chapas verticais origina um aumento do valor da carga crítica de 956,4%, em relação ao modelo D-base, já que esta acção conjunta se traduz num valor da carga crítica de $p_{cr}=82,4$ kN/m. O primeiro modo para estes dois modelos refere-se a um fenómeno de instabilidade local que será impedida pelo reboco e que na realidade não irá acontecer.

A seguir são tratados os casos em que a parede se apresenta unida a outra num dos topos laterais, apresentando-se as configurações da deformada dos modos de encurvadura na figura 5.12.

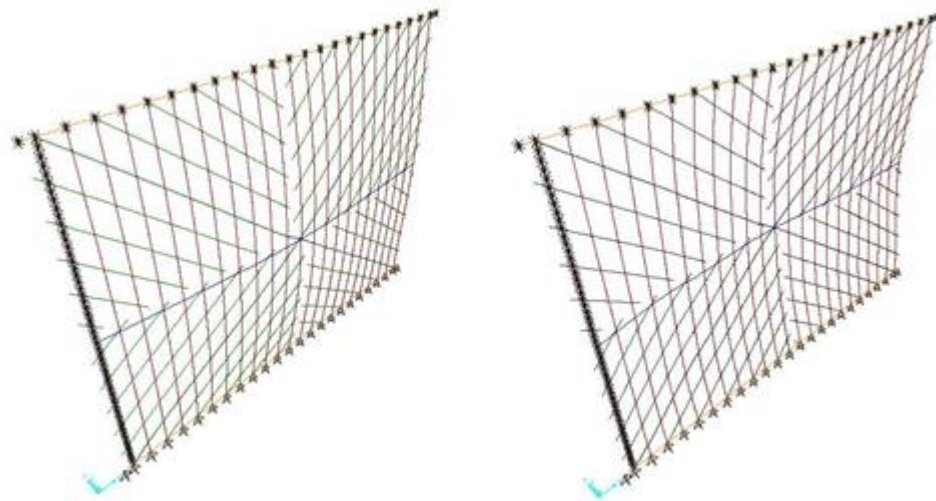


Fig.5.12 – Modelos D-4-RA e D-4-RAV (modo 2)

Relativamente ao modelo D-4-RA, a combinação destas duas soluções (condição de fronteira e solução de reforço RA) apenas exprime o efeito do reforço, visto que o incremento do valor da carga crítica em relação ao modelo D-base, é muito semelhante ao que se obtém para o modelo D-RA. Assim, obtém-se um valor de $p_{cr}=20,8$ kN/m, aumentando 166,7% em relação ao modelo D-base. Por

outro lado o valor da carga crítica que está associado ao modelo D-4-RAV é de $p_{cr}=70,4$ kN/m, ocorrendo um aumento enorme relativamente ao modelo D-base, com uma percentagem de incremento de 802,6%.

Por último, são apresentadas as configurações de deformada dos modos de encurvadura que combinam a introdução dos reforços com aço com o quinto cenário relativo às condições de fronteira.

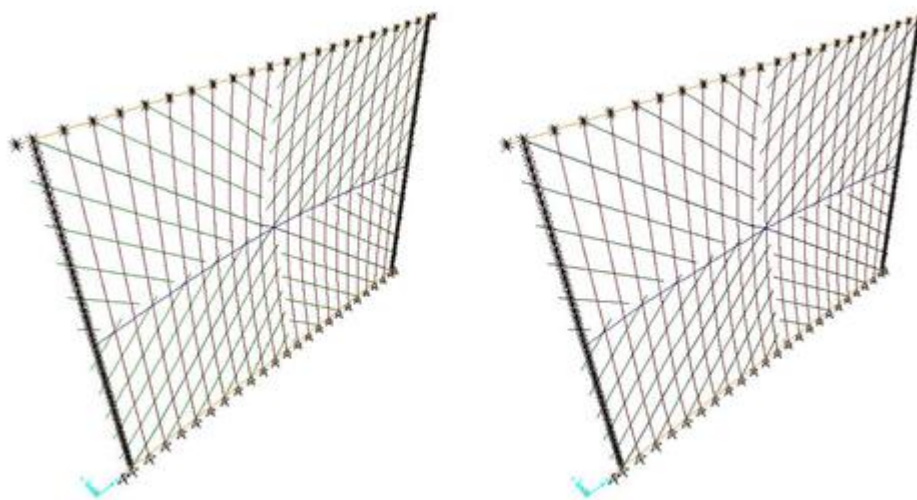


Fig.5.13 – Modelos D-5-RA e D-5-RAV (modo 2)

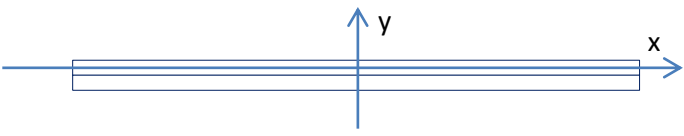
Para o modelo D-5-RA obtém-se um valor de $p_{cr}=21,9$ kN/m para a carga crítica, o que significa um aumento de 180,8% em relação ao modelo D-base. Tal como no modelo D-4-RA, este aumento é muito idêntico ao do modelo D-RA. A combinação destas duas soluções apenas exprime o efeito do reforço. Por sua vez, para o modelo D-5-RAV, tem-se um valor da carga crítica uniformemente distribuída de $p_{cr}=78,1$ kN/m originando um incremento de 901,3% em relação ao modelo D-base.

5.2.2. REFORÇO EM MADEIRA

A segunda ação de reforço passa pela utilização da madeira, em detrimento do aço. Assim, é proposta uma ação de reforço RM (abreviatura para Reforço de Madeira) em que são utilizadas tábuas idênticas às tábuas que constituem a parede. Este reforço é executado com quatro tábuas simples (largura $L=0,15$ m e espessura $e=0,04$ m), assumindo uma disposição diferente da anterior. Existe um conjunto de três tábuas de reforço dispostas na diagonal: uma tábua diagonal central e duas tábuas diagonais que ocupam os terços diagonais da parede, e uma tábua vertical que reforça o centro da parede. Assim, o modelo é composto pelas tábuas que constituem a parede e pelas que servem de reforço, que detêm as mesmas características. À semelhança do que acontece para os cenários que envolvem o aço como material de reforço, para a madeira é também contemplada a inserção de tábuas verticais aos quartos do vão. Para este reforço complementar atribui-se a designação RMV (abreviatura para Reforço de Madeira Vertical). Considera-se nesta operação de reforço que as tábuas diagonais serão rigidamente ligadas às tábuas diagonais e (ou) verticais do tabique.

Tal como no cenário de reforço que envolve a utilização de aço, considera-se que a intervenção é feita apenas de um lado da parede. Os valores relativos às características geométricas das tábuas de reforço associados a este tipo de intervenção são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Propriedades geométricas do sistema de reforço numa das faces da parede

Centro de gravidade da tábua + tábua de reforço numa das faces, em relação ao centro da tábua existente	
YG = -2.000E-02 m	
Inércia da tábua de reforço em relação ao eixo paralelo ao eixo x que passa no centro de gravidade anterior	
$I_{xG} = 3.200E-06 m^4$ $I_{yG} = 1.125E-05 m^4$ $A = 6.000E-03 m^2$	

Assim, tem-se a seguinte descrição, de forma resumida, para os cenários de reforço adotados.

- RM: Reforço com três tábuas simples diagonais e uma tábua simples vertical de madeira;
- RMV: Reforço RM com a adição de tábuas verticais de madeira aos quartos do vão.

5.2.2.1. Resultados

A exposição dos modelos envolvidos nesta análise de reforço é feita na tabela 5.5, analisando-se exactamente o mesmo conjunto de modelos referidos em relação ao reforço em aço, sendo a justificação apresentada nessa seção válida para ambos.

Tabela 5.5 – Modelos analisados

Parede simples						Parede dupla	
Modelo S		Modelo SA		Modelo SP		Modelo D	
S-RM	S-RMV	-	-	SP-RM	-	D-RM	D-RMV
S-3-RM	S-3-RMV	-	-	SP-3-RM	-	D-3-RM	D-3-RMV
S-4-RM	S-4-RMV	-	-	SP-4-RM	-	D-4-RM	D-4-RMV
S-5-RM	S-5-RMV	-	-	SP-5-RM	-	D-5-RM	D-5-RMV

Posto isto, na figura 5.14 são apresentadas as configurações de deformada para os modelos S-RM e S-RMV, que dizem respeito ao reforço da parede para o modelo base. Como já foi visto anteriormente para as soluções com aço, a introdução das tábuas implica a remoção do fasquiado.

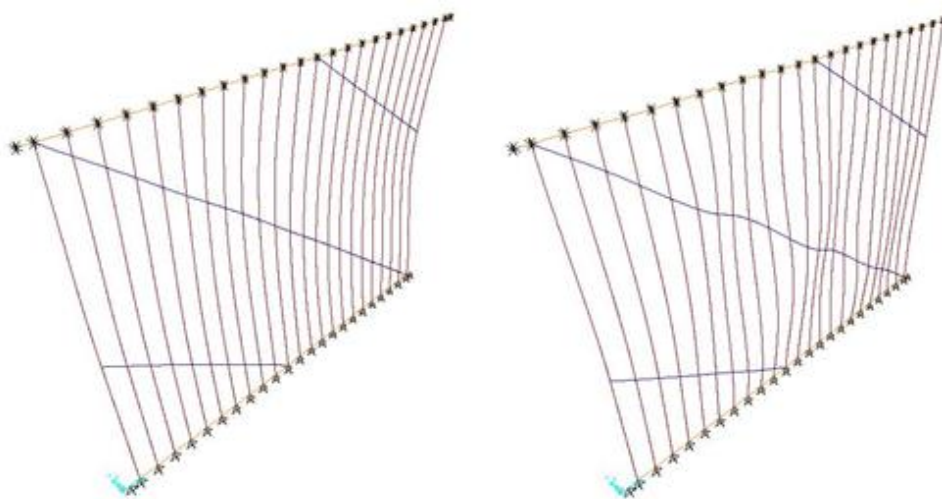


Fig.5.14. – Modelos S-RM e S-RMV

No que diz respeito ao primeiro modelo, constata-se que o modo de encurvadura da parede corresponde a uma configuração deformada em que todas as tábuas encurvam de forma homogénea para uma carga crítica uniformemente distribuída $p_{cr}=101,4$ kN/m. Este valor aumenta de 118,5% em relação modelo S-base, o que representa um acréscimo importante na resistência da parede. Esta distribuição das tábuas de reforço garante uma disposição que permite a cobertura da zona central e dos dois terços diagonais.

Para o segundo modelo, a parede apresenta uma configuração deformada correspondente ao modo de encurvadura diferente da anterior. As tábuas encurvam de forma não homogénea, apresentando curvaturas múltiplas e em diferentes sentidos. A respetiva carga crítica é $p_{cr}=128,2$ kN/m, aumentando de 176,3% em relação ao valor da carga crítica para o modelo S-base.

Seguidamente, a combinação apresentada diz respeito ao reforço da parede em conjunto com a aplicação das cantoneiras na base e no topo da parede de tabique. Assim, a configuração da deformada do modo de encurvadura para cada um dos modelos S-3-RM e S-3-RMV é apresentada na figura 5.15.

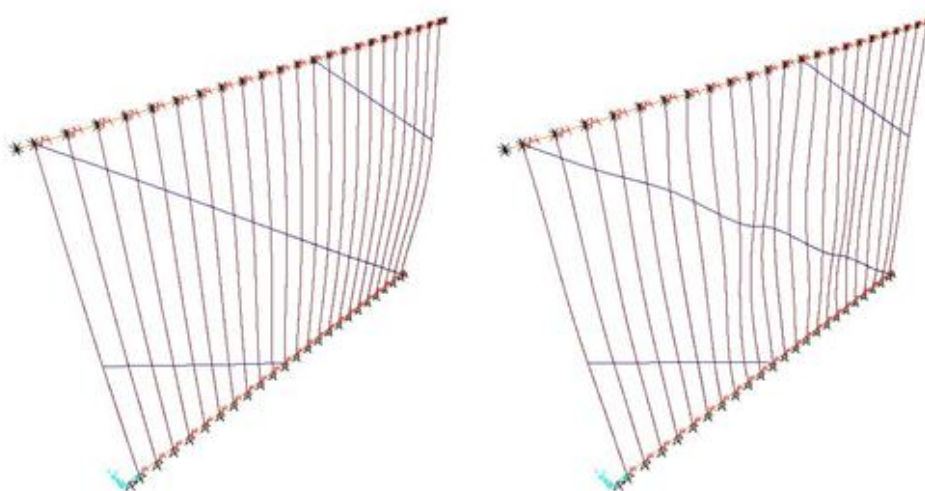


Fig.5.15. – Modelos S-3-RM e S-3-RMV

O primeiro modelo apresenta um modo de encurvadura idêntico ao do modelo S-RM, e uma carga crítica de $p_{cr}=121,9$ kN/m. Este valor traduz-se num incremento de 162,7%, quando comparado com o valor que se obtém para o modelo S-base. No segundo caso tem-se que o valor da carga crítica, $p_{cr}=141,5$ kN/m, aumenta relativamente ao modelo anterior. Para este modelo verifica-se uma subida do valor da carga crítica de 205,0%, em relação ao modelo S-base.

Para os casos em que a parede reforçada se apresenta ligada a uma outra parede num dos topos laterais, as configurações de deformada dos modos de encurvadura são as apresentadas na figura 5.16.



Fig.5.16. – Modelos S-4-RM e S-4-RMV

O primeiro modelo caracteriza-se por apresentar uma deformada em que as tábuas encurvam todas no mesmo sentido e em simultâneo, sendo que a ligação da parede de tabique a outra parede permite que as tábuas que lhes estão mais próximas não apresentem uma curvatura tão evidente, embora sigam a mesma tendência das restantes, encurvando e levando com elas a tábua de madeira que lhes serve de reforço. Assim, a região da parede mais afastada da zona que se encontra travada apresenta uma deformada mais pronunciada, já que está próxima do topo da parede que se encontra livre, podendo encurvar mais livremente. O valor da carga crítica para este modelo é de $p_{cr}=107,9$ kN/m, aumentando 132,5% em relação ao valor da carga crítica associado ao modelo S-base.

Para o segundo modelo, o valor da carga crítica é de $p_{cr}=140,4$ kN/m, o que se traduz numa evidente melhoria, com uma subida de 202,6% do valor da carga crítica em relação ao modelo S-base.

Por fim, para o modelo S são apresentados, na figura 5.17 os modelos S-5-RM e S-5-RMV.

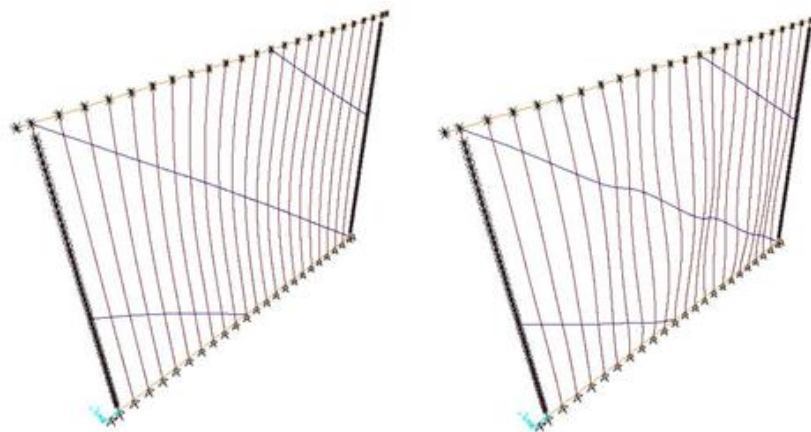


Fig.5.17. – Modelos S-5-RM e S-5-RMV

A configuração da deformada do modo de encurvadura que se obtém para o primeiro modelo torna visível que a deformação é mais pronunciada na zona central, sendo que à medida que se caminha no sentido dos topos as tábuas diminuem a sua deformação. O valor da carga crítica para este modelo é de $p_{cr}=130,1$ kN/m, ocorrendo uma subida de 180,4% em relação ao valor obtido para o modelo S-base.

Para o modelo S-5-RMV verifica-se que o valor da carga crítica uniformemente distribuída, $p_{cr}=145,1$ kN/m aumenta. Em termos percentuais tem-se um incremento de 212,7% do valor da carga crítica relativamente ao modelo S-base.

Os resultados decorrentes da aplicação dos reforços definidos para a parede de tabique simples com abertura são apresentados a seguir, iniciando-se com a apresentação, na figura 5.18, da configuração da deformada do modo de encurvadura para o modelo base reforçado.

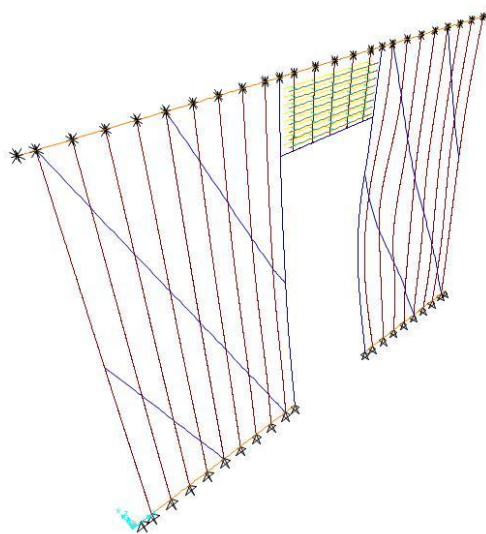


Fig.5.18 – Modelo SP-RM (modo 2)

Observa-se que modo de encurvadura da parede (neste caso o segundo modo, dado que o primeiro modo refere-se a um fenómeno de instabilidade local que será impedida pelo reboco e que na realidade não irá acontecer) corresponde a uma configuração deformada em que apenas o prumo mais à direita e as quatro tábuas seguintes são mobilizados, sendo a respetiva carga crítica de $p_{cr}=89,2$ kN/m. Este reforço introduz um incremento de 130,5% em relação ao valor da carga crítica associado ao modelo SP-base.

De seguida, na figura 5.19 é apresentado o cenário em que são introduzidas as cantoneiras na base e no topo da parede, combinado com a solução de reforço.

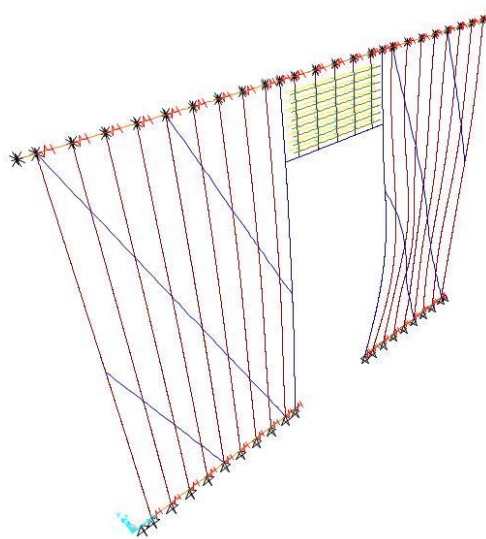


Fig.5.19 – Modelo SP-3-RM (modo 2)

Verifica-se que a zona mais instável coincide com a do modelo anterior, sendo que este instabiliza para uma carga crítica de valor superior, devido à introdução da cantoneira, $p_{cr}=98,3$ kN/m. As tábuas verticais mobilizadas apresentam-se menos deformadas, pelo fato de verem a sua ligação aos frechal superior e inferior melhorada. A deformada corresponde ao segundo modo de encurvadura e, comparativamente ao modelo SP-base, verifica-se um aumento do valor da carga crítica de 154,0%.

Finalizando o estudo do modelo SP reforçado, mostra-se na figura 5.20 o caso que combina a ligação do topo esquerdo da parede de tabique, ou de ambos os topos a outra parede com o reforço sugerido.

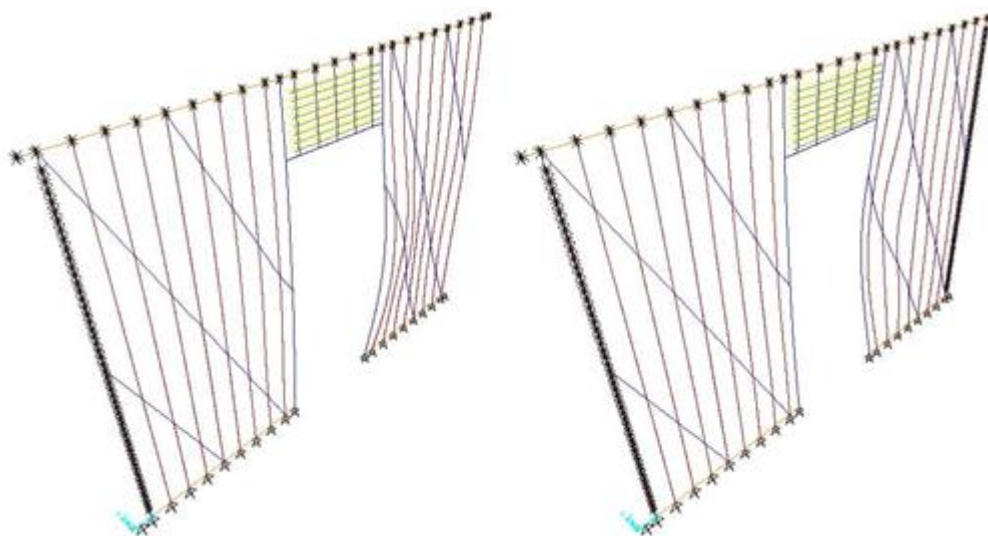


Fig.5.20 – Modelos SP-4-RM e SP-5-RM

A deformada prevista para estes modelos movimenta o mesmo conjunto de tábuas que nos modelos anteriores. Verifica-se ainda que o valor da carga crítica uniformemente distribuída é de $p_{cr}=89,5$

kN/m para o primeiro e de $p_{cr}=89,0$ kN/m para o segundo, traduzindo o mesmo incremento do valor da carga crítica, cerca de 130,0%, em relação ao modelo SP-base. Esta proximidade de valores pode ser explicada pelo fato da solução de reforço restringir à partida, embora de forma parcial, o movimento dos topos da parede, fazendo com que o travamento da parede nas suas extremidades não lhe traga grandes benefícios.

Por último, são apresentados os resultados relativos ao modelo D. Assim, na figura 5.21 mostram-se as configurações da deformada dos modos de encurvadura para os modelos D-RM e D-RMV, respetivamente. Relativamente aos modelos afectados pela solução de reforço RMV, tem-se que as configurações da deformada correspondem ao segundo modo de encurvadura, uma vez que o primeiro modo representa um modo localizado.

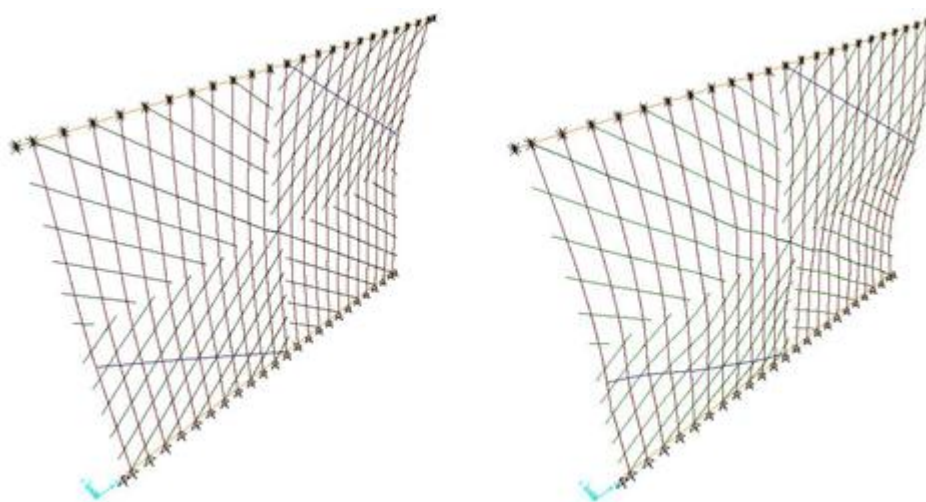


Fig.5.21. – Modelos D-RM e D-RMV (modo 2)

Para o primeiro modelo a parede adquire uma configuração do modo de encurvadura em que todas as tábuas instabilizam da mesma forma, sendo a carga crítica uniformemente distribuída de $p_{cr}=33,1$ kN/m. Este valor da carga crítica representa uma subida de 324,4% quando comparado com o valor obtido para o modelo D-base. Para o segundo modelo, verifica-se que a zona da parede que se encontra mais instável é a zona central que se situa entre a colocação da tabua vertical de reforço localizada no quarto esquerdo da parede, e a tábuia diagonal que percorre a parede da extremidade superior esquerda até à extremidade inferior direita. A variedade de soluções relativas ao tipo de travamento, e a maneira como as tábuas que constituem a parede estão dispostas dão origem a uma deformada bastante irregular. O valor para a carga crítica é de $p_{cr}=73,2$ kN/m, ocorrendo um aumento de 838,5% em relação ao modelo D-base.

As combinações apresentadas de seguida dizem respeito ao reforço da parede conciliado com a aplicação das cantoneiras na base e no topo. Assim, as configurações da deformada dos modos de encurvadura são apresentadas na figura 5.22.

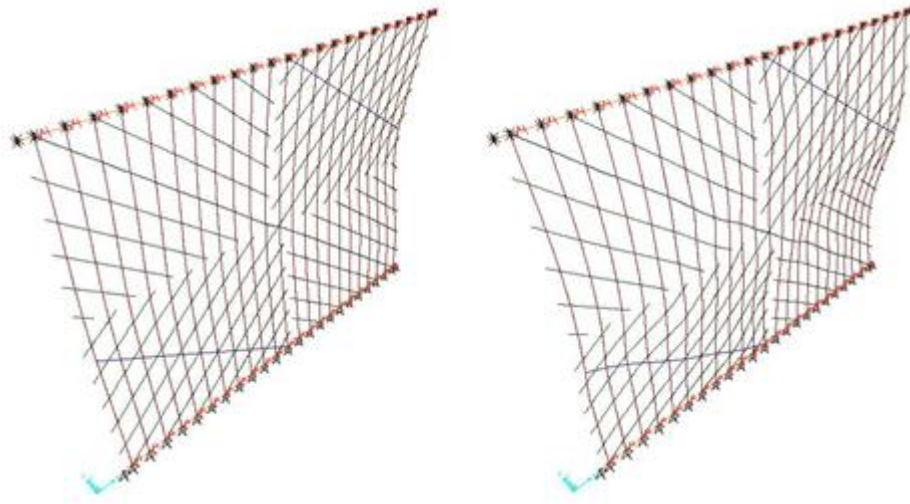


Fig.5.22. – Modelos D-3-RM e D-3-RMV

A colocação das cantoneiras introduz melhorias para as tábuas mais afectadas pelo fenómeno da encurvadura, obtendo-se um valor de $p_{cr}=46,2\text{kN/m}$ para o modelo D-3-RM e de $p_{cr}=87,5\text{kN/m}$ para o modelo D-3-RMV. Comparando estes valores com o valor da carga crítica para o modelo D-base, verifica-se um aumento de 492,3% e 1021,8%, respectivamente.

Para os casos em que a parede de tabique não se encontra totalmente livre nas suas extremidades, obtém-se as seguintes configurações de deformada para os modos de encurvadura correspondentes ao segundo modo.

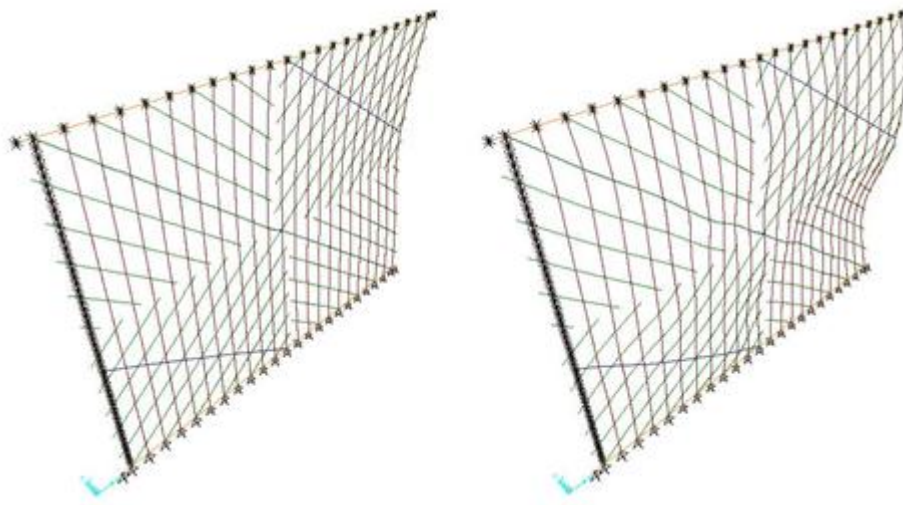


Fig.5.23. – Modelos D-4-RM (modo 2) e D-4-RMV (modo 2)

Para o primeiro modelo a carga crítica uniformemente distribuída é de $p_{cr}=36,5\text{kN/m}$, o que traduz um acréscimo de 367,9% em relação ao modelo D-base. Relativamente ao modelo D-4-RMV, com uma configuração de deformada que afeta a zona central e a extremidade da parede que se encontra livre, obtém-se um valor para a carga crítica de, $p_{cr}=98,7\text{kN/m}$, correspondendo a um incremento do valor da carga de 1165,4%, relativamente ao modelo D-base.

Finalmente, mostram-se as configurações de deformada para os modelos D-5-RM e D-5-RMV.

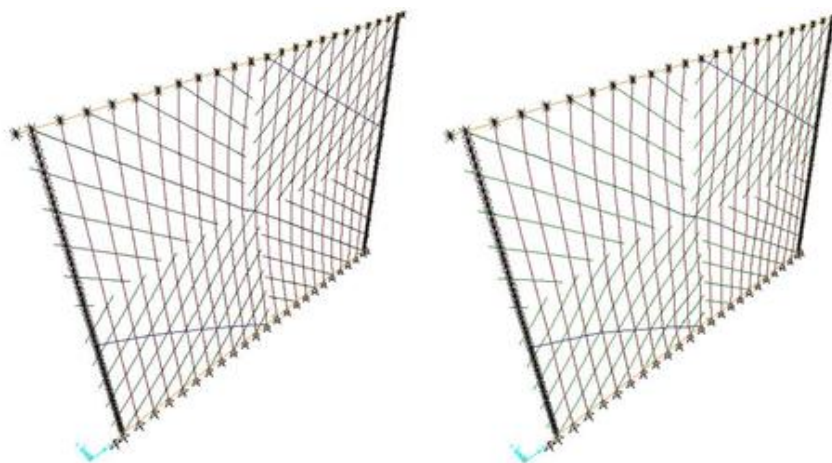


Fig.5.24. – Modelos D-5-RM e D-5-RMV

Para o primeiro modelo obtém-se uma carga crítica de $p_{cr}=52,1\text{kN/m}$, enquanto que para o segundo caso o valor da carga crítica é $p_{cr}=143,7\text{kN/m}$. Ambos conferem melhorias bastante significativas, sendo que a comparação destes valores com o que se obtém para o modelo D-base permite verificar que ocorre um grande incremento do valor da carga, de 567,9% no primeiro e 1742,3% no segundo caso.

5.3. ANÁLISE COMPARATIVA

Organizam-se agora nas tabelas 5.6 e 5.7 os valores para a carga crítica dos modelos reforçados com aço e com madeira, respectivamente.

Tabela 5.6 – Carga crítica de encurvadura - Paredes reforçadas com aço (RA e RAV)

Carga de encurvadura (kN/m)						
Parede simples					Parede dupla	
Modelo S			Modelo SP		Modelo D	
Reforço		RA	RAV	RA	RA	RAV
Cenários	Base	85,3	132,5	92,9	19,7	63,0
	3	106,9	155,5	108,6	33,7	82,4
	4	88,7	139,0	115,9	20,8	70,4
	5	97,7	161,2	156,1	21,9	78,1

Tabela 5.7 – Carga crítica de encurvadura - Paredes reforçadas com madeira (RM e RMV)

Carga de encurvadura (kN/m)						
Parede simples					Parede dupla	
Modelo S				Modelo SP	Modelo D	
Reforço		RM	RMV	RM	RM	RMV
Cenários	Base	101,4	128,2	89,2	33,1	73,2
	3	121,9	141,5	98,3	46,2	87,5
	4	107,9	140,4	89,5	36,5	98,7
	5	130,1	145,1	89,0	52,1	143,7

Para uma análise mais detalhada, de forma a perceber a melhoria introduzida por cada solução, apresentam-se as tabelas 5.8, 5.9 e 5.10, onde se encontram os modelos por ordem decrescente de melhoria introduzida e o respectivo incremento do valor da carga crítica (em percentagem) quando comparada com a que foi obtida para os modelos base. Para o mesmo modelo são apresentadas, lado a lado, as soluções de reforço que envolvem o aço e a madeira de modo a facilitar a sua comparação quando se combinam com a mesma condição de fronteira. É ainda apresentada a percentagem de subida dos valores das cargas correspondentes aos reforços RAV e RMV relativamente aos modelos RA e RM que apresentam a mesma condição de fronteira.

Tabela 5.8 – Incremento percentual da carga crítica em relação ao modelo base e entre soluções de reforço (RA-RAV e RM e RMV) - Modelo S

Modelo S				
Reforço em Aço			Reforço em Madeira	
	Incremento em relação ao modelo base (%)	Incremento em relação ao modelo RA (%)	Incremento em relação ao modelo base (%)	Incremento em relação ao modelo RM (%)
S-5-RAV	247,4	65,0	S-5-RMV	11,5
S-3-RAV	235,1	45,5	S-3-RMV	16,1
S-4-RAV	199,6	56,7	S-4-RMV	30,1
S-RAV	185,6	55,3	S-5-RM	-
S-3-RA	130,4	-	S-RMV	26,4
S-5-RA	110,6	-	S-3-RM	-
S-4-RA	91,2	-	S-4-RM	-
S-RA	83,8	-	S-RM	-

Tabela 5.9 – Incremento percentual da carga crítica em relação ao modelo base - Modelo SP

Modelo SP			
Reforço em Aço		Reforço em Madeira	
	Incremento em relação ao modelo base (%)		Incremento em relação ao modelo base (%)
SP-5-RA	303,4	SP-3-RM	154,0
SP-4-RA	199,5	SP-4-RM	131,3
SP-3-RA	180,6	SP-RM	130,5
SP-RA	140,1	SP-5-RM	130,0

Tabela 5.10 – Incremento percentual da carga crítica em relação ao modelo base e entre soluções de reforço (RA-RAV e RM e RMV) - Modelo D

Modelo D				
Reforço em Aço			Reforço em Madeira	
(%)	Incremento em relação ao modelo base (%)	Incremento em relação ao modelo RA (%)	Incremento em relação ao modelo base (%)	Incremento em relação ao modelo RM (%)
D-3-RAV	956,4	144,5	D-5-RMV	175,8
D-5-RAV	901,3	256,6	D-4-RMV	170,4
D-4-RAV	802,6	238,5	D-3-RMV	89,4
D-RAV	708,0	219,8	D-RMV	121,1
D-3-RA	332,1	-	D-5-RM	-
D-5-RA	180,8	-	D-3-RM	-
D-4-RA	166,7	-	D-4-RM	-
D-RA	152,6	-	D-RM	-

Os valores apresentados para a carga crítica evidenciam uma melhoria no comportamento à encurvadura para todos os casos decorrentes da aplicação dos reforços.

Relativamente ao modelo S, verifica-se que a intervenção com o aço ou com a madeira traduz-se em resultados semelhantes sendo que a aplicação da madeira como medida de reforço apresenta resultados ligeiramente superiores. Para o modelo com abertura, a utilização do aço apresenta melhorias mais evidentes e para a parede dupla é o reforço com madeira o mais eficiente.

No modelo S reforçado com aço as soluções que combinam a introdução deste reforço com a “amarração” da parede nos topos laterais e com a introdução das cantoneiras na base e no topo da parede são as que apresentam melhores resultados. Relativamente às paredes reforçadas com madeira, esta ordem de um modo geral mantém-se. Como já foi visto, o reforço com aço, ou com madeira origina resultados semelhantes. Quando se comparam os resultados dos reforços que complementam os quartos do vão com chapas metálicas, ou tábuas de madeira com as soluções RA e RM, respectivamente, verifica-se que a primeira se traduz num incremento superior em relação à segunda (tabela 5.8).

Relativamente ao modelo SP, as soluções com reforço de madeira apresentam piores resultados quando comparadas com as paredes reforçadas com aço. Destaca-se o modelo SP-5-RA e os modelos SP-4-RA e SP-3-RA, que apresentam resultados semelhantes. Para o reforço de madeira destaca-se apenas o modelo que combina a introdução das cantoneiras na base e no topo com o reforço referido. Para as outras combinações propostas os resultados são os mesmos que se obtêm apenas quando é aplicado o reforço. A consideração dos cenários 4 e 5 não alteram o valor da carga crítica.

Quanto ao modelo D, os melhores resultados surgem com a introdução dos reforços RAV e RMV combinados com as condições de fronteira 5, 3 e 4, tal como no modelo S. Para este modelo a intervenção com madeira assume-se como a melhor solução, originando incrementos do valor da carga bastante superiores aos que ocorrem quando é aplicado o aço. Relativamente à comparação de resultados dos reforços que complementam os quartos do vão com chapas metálicas ou tábuas de madeira com as soluções RA e RM, respectivamente, constata-se e generaliza-se que a primeira se traduz num incremento superior em relação à segunda.

6

COMPORTAMENTO DAS PAREDES DE TABIQUE A AÇÕES HORIZONTAIS

6.1. OBJETIVOS

Os objectivos deste capítulo são:

- Avaliar a rigidez horizontal das paredes de tabique estudadas nos capítulos 4 e 5.

6.2. INTRODUÇÃO

Depois de avaliar a capacidade resistente à compressão através do cálculo da carga crítica, nesta seção avalia-se a rigidez das paredes quando submetidas a ações horizontais, correspondentes a uma carga uniformemente distribuída atuante no plano da parede, com a direcção do eixo xx e o sentido da esquerda para a direita, aplicada no frechal superior. Com este cálculo pretende-se avaliar a capacidade destas paredes poderem funcionar como elementos de contraventamento horizontal.

Estudou-se então, de forma numérica e em comportamento linear elástico, a rigidez das paredes de tabique às ações horizontais referidas, analisando-se o contributo das ripas do fasquio, a influência da distribuição das tábuas (tabique simples e tabique duplo) e das ações de reforço.

6.3. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Nesta seção é apenas estudado o cenário base, e os cenários 1 e 2 definidos para as condições de fronteira. Nas tabelas 6.1 e 6.2 são apresentadas as condições de fronteira adotadas para os casos estudados, sendo que o bloqueio em cada direção representado pelo número 1.

Tabela 6.1 – Condições de fronteira respeitantes ao frechal superior e inferior da parede

	Frechal Inferior				Frechal Superior				Nó extremo Esq. Nó extremo Dir.	
	Ux	Uy	Uz	Rx	Ux	Uy	Uz	Rx	Uz	Uz
Base	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0
Cenário 1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0
Cenário 2	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1

Tabela 6.2 – Condições de fronteira respeitantes ao topo esquerdo e direito da parede

	Lado E				Lado D			
	Ux	Uy	Uz	Rx	Ux	Uy	Uz	Rx
Base	0	0	0	0	0	0	0	0
Cenário 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Cenário 2	0	0	0	0	0	0	0	0

6.4. MODELOS E RESULTADOS

A análise consiste na determinação do valor da rigidez horizontal associada a cada um dos quatro modelos S, SA, SP e D, sendo que a informação relativa ao conjunto de análises propostas está organizada nas tabelas 6.3 e 6.4.

Tabela 6.3 – Modelos analisados-condições de fronteira

Parede simples			Parede dupla
Modelo S	Modelo SA	Modelo SP	Modelo D
S-base	SA-base	SP-base	D-base
S-1	SA-1	SP-1	D-1
S-2	SA-2	SP-2	D-2

Tabela 6.4 – Modelos analisados-reforço em aço e madeira

Parede simples					Parede dupla	
Modelo S		Modelo SA	Modelo SP		Modelo D	
S-2-RA	S-2-RAV	-	-	SP-2-RA	D-2-RA	D-2-RAV
S-2-RM	S-2-RMV	-	-	SP-2-RM	D-2-RM	D-2-RMV

Como após a remoção das ripas a estrutura sobranete formada pelas tábuas e pelos frechais superior e inferior que constituem a parede é exactamente a mesma para os modelos S e SA, as famílias de modelos reforçados associadas ao modelo SA apresentam exactamente os mesmos elementos dos modelos relativos ao modelo S. Assim, o conjunto de resultados obtidos para os reforços RA, RAV, RM e RMV são os mesmos, quer para o modelo S, quer para o modelo SA.

Criados os modelos que interessam para os casos de estudo, determina-se então a rigidez horizontal para todos eles. Para cada caso, o valor da rigidez (k) é determinado considerando a média dos deslocamentos dos dois nós extremos superiores. Assim, tem-se que $k = \frac{1 \text{ kN/m} \times L}{dm}$, onde dm representa a média dos deslocamentos dos dois nós extremos superiores.

Posto isto, a análise é iniciada com a determinação da rigidez associada ao modelo S, que diz respeito à tipologia de paredes de tabique simples com fasquio excêntrico. Na figura 6.1 é apresentada a deformada para o modelo base e na figura 6.2 é apresentada a deformada para os modelos S-1 e S-2.

Nas figuras 6.3 e 6.4 são apresentadas as deformadas para os modelos com as soluções de reforço RA, RAV, RM e RMV, respetivamente.

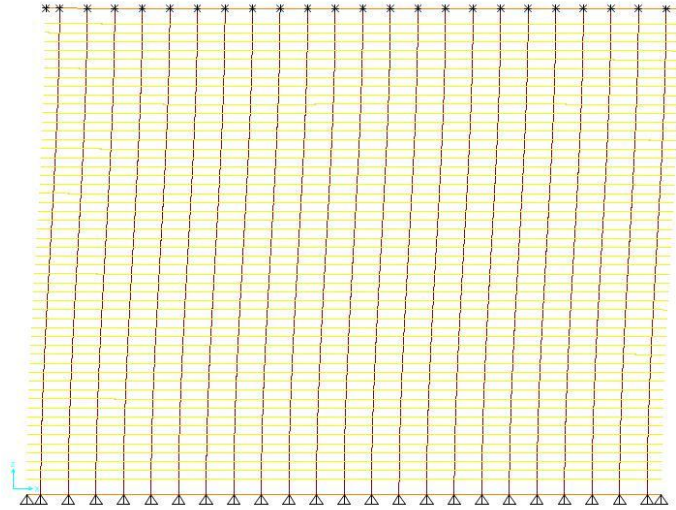


Fig.6.1 – Modelo S-base

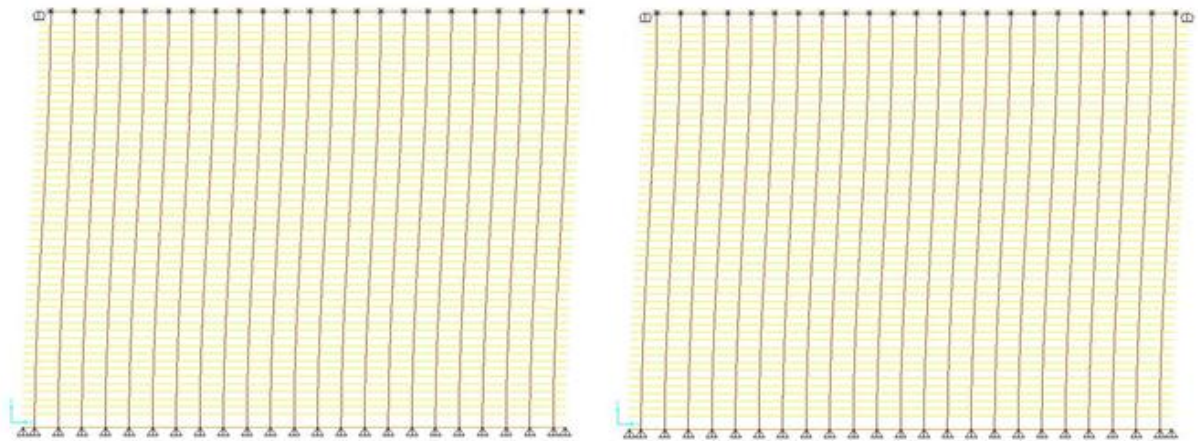


Fig.6.2 – Modelos S-1 e S-2

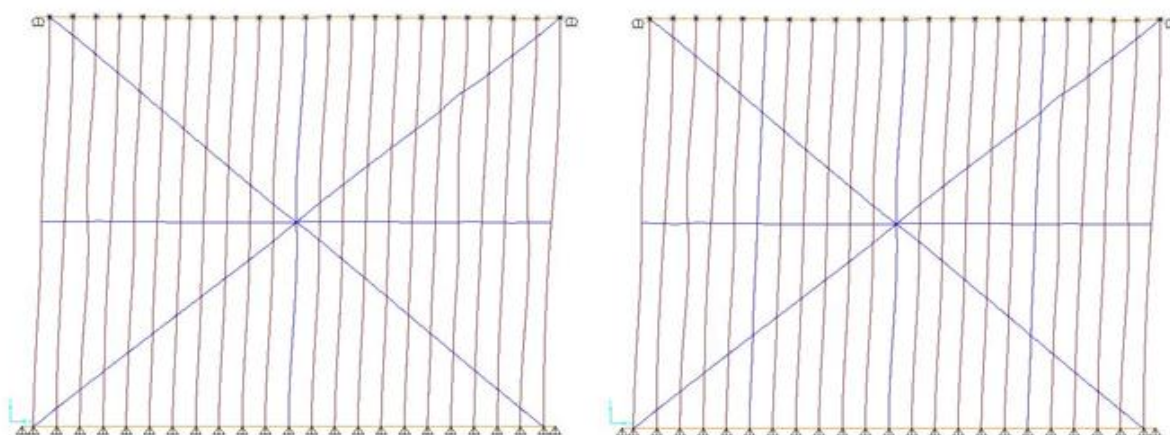


Fig.6.3 – Modelos S-2-RA e S-2-RAV

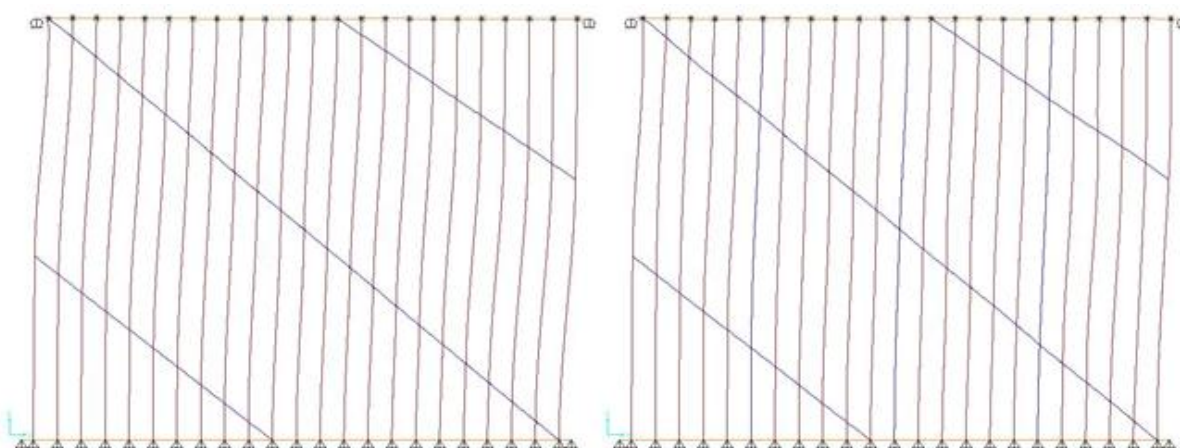


Fig.6.4 – Modelos S-2-RM e S-2-RMV

O valor da rigidez para cada modelo é apresentado na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Rigidez horizontal-Modelo S

Rigidez (kN/m)	Sem reforço			Com reforço			
				Aço		Madeira	
	S-base	S-1	S-2	S-2-RA	S-2-RAV	S-2-RM	B-2-RMV
	997,4	1011,7	1019,1	16344,5	16483,1	8722,0	9860,6

Analisando a tabela apresentada constata-se que, para as soluções que não apresentam qualquer tipo de reforço, a variação do valor da rigidez horizontal é pouco pronunciada, verificando-se que a fixação de um nó extremo ou dos dois não traz alterações significativas ao comportamento da estrutura. Porém, as paredes reforçadas apresentam melhorias visíveis em relação às paredes não reforçadas. A rigidez do modelo correspondente à introdução do reforço de aço RA apresenta melhorias de 1538,7%,

relativamente ao modelo base. Por sua vez, o acrescento das chapas verticais aos quartos do vão produzem um aumento de rigidez de 1,39% em relação ao modelo RA.

Para o caso do modelo reforçado com madeira (RM) obtém-se um valor de rigidez que introduz uma subida de 774,5% em relação ao modelo base, evidenciando um acrescento menos pronunciado do que a solução com aço, sendo a diferença de rigidez entre as soluções de reforço RM e RMV, 13,1%, maior do que a ocorrida entre as soluções RA e o RAV.

O modelo que a seguir se apresenta é o modelo SA. Tendo em conta que as dimensões do fasquio para este modelo, único e centrado, são impostas de maneira a assegurar as condições do fasquio duplo e excêntrico do modelo S, é necessário, à semelhança do que foi feito no capítulo referente à encurvadura, definir uma peça que obedeça a estes pressupostos.

Assim, para o caso da determinação da rigidez horizontal das paredes de tabique o cálculo das novas dimensões do fasquio tem como condições a igualdade da área e do momento de inércia na direção perpendicular ao plano da parede em relação ao fasquio do modelo S. De acordo com a figura 6.5, ao contrário do que acontecia para a encurvadura, neste caso interessa respeitar a inércia em torno do eixo dos xx porque é em torno deste eixo que o fasquio irá “trabalhar”.

Posto isto, a determinação das novas dimensões do fasquio, único e centrado, resulta numa peça com uma base de 2,98 cm e uma altura de 2,26 cm.

Os cálculos detalhados relativos a este procedimento são a seguir apresentados, juntamente com as figuras 6.5 e 6.6, para o fasquio excêntrico e centrado, respectivamente.

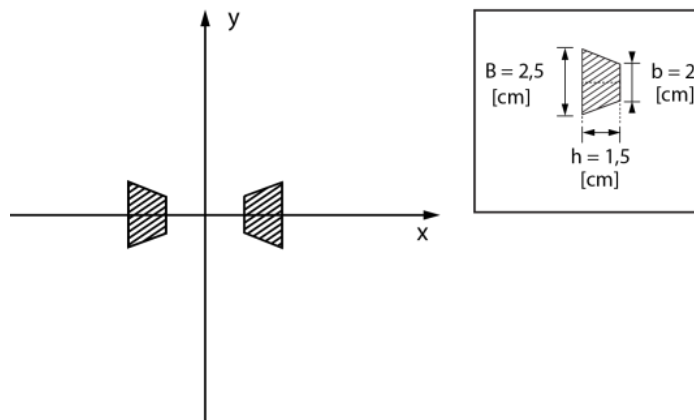


Fig.6.5 – Fasquio excêntrico

$$I_x = 2 \times [h/48 \times (b^3 + b^2 \times B + b \times B^2 + B^3)] = 2 \times [1,5/48 \times (2^3 + 2^2 \times 2,5 + 2 \times 2,5^2 + 2,5^3)] = 2,883 \text{ cm}^4 \quad (6.1)$$

$$A = \left(\frac{B+b}{2} \times h \right) \times 2 = \left(\frac{2,5+2}{2} \times 1,5 \right) \times 2 = 6,75 \text{ cm}^2 \quad (6.2)$$

Determinada a área e a inércia em relação ao eixo dos xx, obtêm-se os valores para a base e altura do novo elemento.

$$\begin{cases} A = b \times h \\ I_x = \frac{b \times h^3}{12} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 6,75 = b \times h \\ 2,883 = \frac{b \times h^3}{12} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} h = 2,26 \text{ cm} \\ b = 2,98 \text{ cm} \end{cases} \quad (6.3)$$

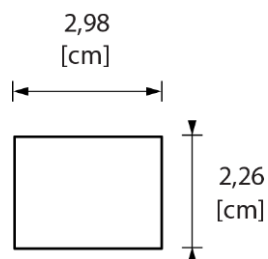


Fig.6.6 – Fasquio centrado

Para este modelo apenas se considera o modelo base e os cenários que envolvem a aplicação das condições de fronteira definidas para este caso de carga. Nas figuras 6.7 e 6.8 são apresentadas as deformadas para os modelos referidos.

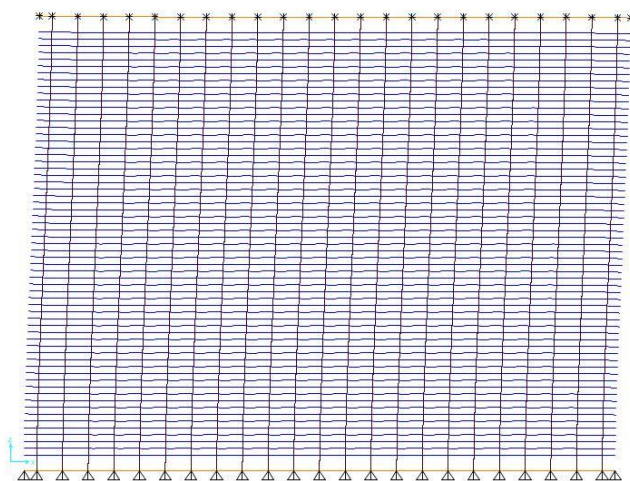


Fig.6.7 – Modelo SA-base

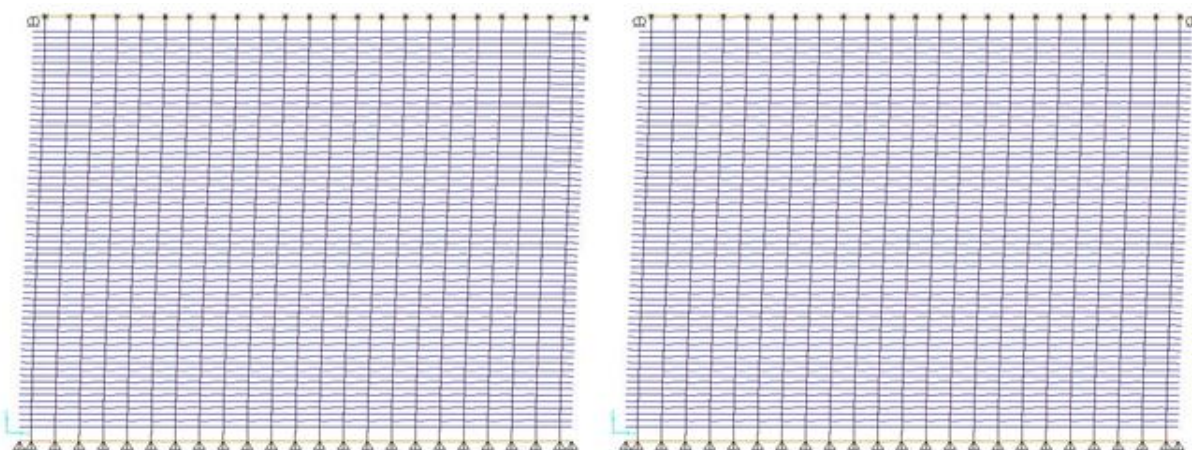


Fig.6.8 – Modelo SA-1 e SA-2

A rigidez horizontal, obtida para os modelos SA-base, SA-1 e SA-2 é apresentada na tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Rigidez horizontal-Modelo SA

Rigidez (kN/m)	Sem reforço		
	SA-base	SA-1	SA-2
	3817,5	3897,8	3977,5

A análise destes modelos sugere que o modelo SA sobrevaloriza a parede em termos de rigidez. Para este modelo, o fasquio liga-se às tábuas de forma rígida, ao passo que no modelo S o fasquio é excêntrico e essa ligação é materializada por um elemento de viga de rigidez à torção baixa. A diferença destes dois modelos está apenas na apresentação e ligação do fasquio às tábuas verticais, verificando-se uma diferença de 282,7% do modelo S-base para o modelo SA-base quando se compara o valor da rigidez.

Dando continuidade à análise dos modelos sugeridos, a seguir é introduzido o modelo SP. Na figura 6.9 é apresentada a configuração de deformada para o modelo base e na figura 6.10 são apresentadas as configurações de deformada para os modelos S-1 e S-2. Na figura 6.11 surgem as configurações de deformada dos modelos SP-2-RA e SP-2-RM.

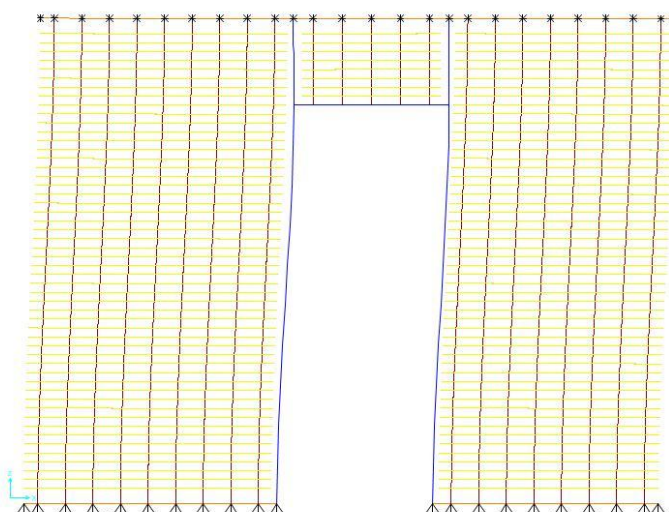


Fig.6.9 – Modelo SP-base

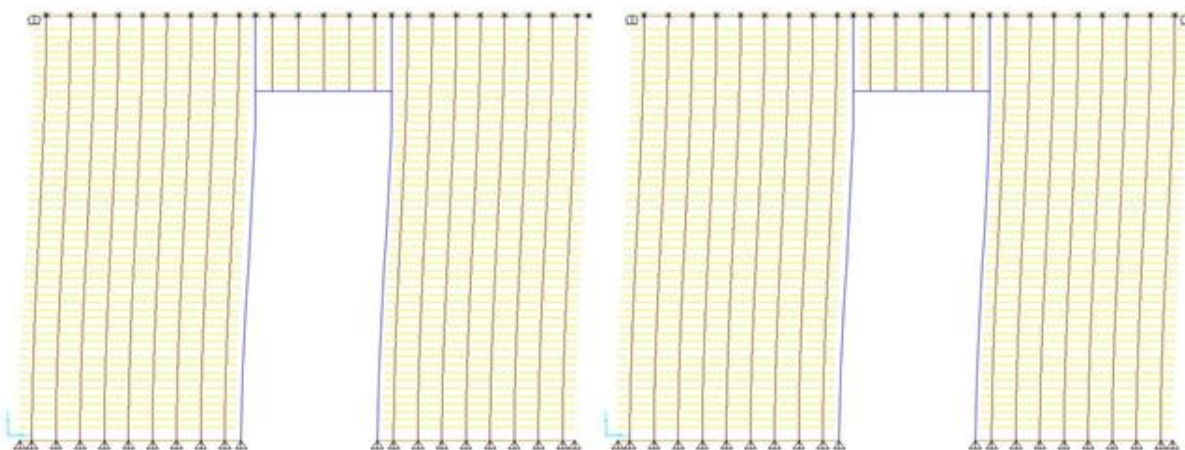


Fig.6.10 – Modelos SP-1 e SP-2

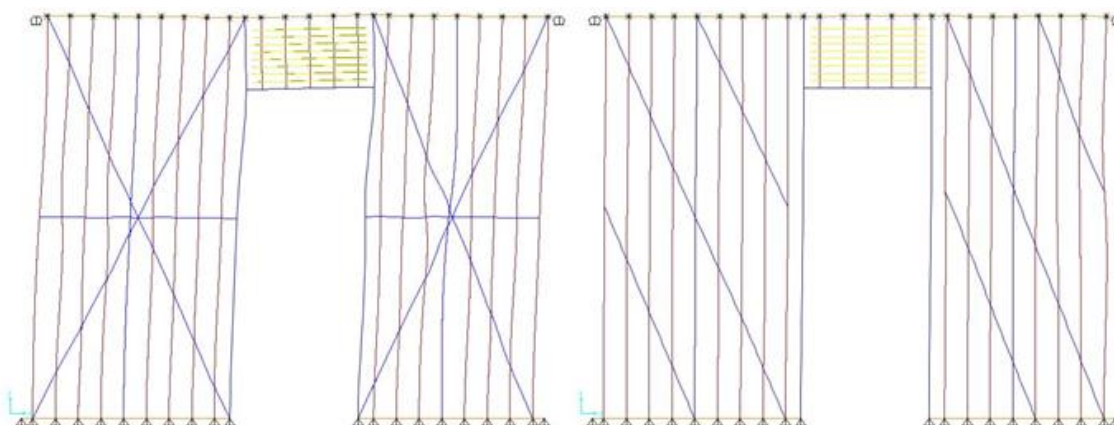


Fig.6.11 – Modelos SP-2-RA e SP-2-RM

O valor da rigidez horizontal para cada modelo é apresentado na tabela 6.7

Tabela 6.7 – Rigidez horizontal - Modelo SP

Rigidez (kN/m)	Sem reforço			Com reforço	
				Aço	Madeira
	SP-base	SP-1	SP-2	SP-2-RA	SP-2-RM
	761,0	768,6	776,6	10471,1	6294,5

Para estes modelos verifica-se uma queda do valor da rigidez horizontal, relativamente ao modelo S, pelo facto da parede conter uma abertura. Continua a verificar-se que a colocação das chapas de aço se traduz em melhores resultados do que a aplicação da madeira como elementos de reforço. A aplicação das chapas traduz-se num aumento do valor da rigidez horizontal que é aproximadamente 14 vezes maior que o valor associado ao modelo SP-base que não considera qualquer tipo de reforço. No que diz respeito à solução de reforço de madeira, esse valor é aproximadamente 8 vezes maior.

Por último, é apresentado o modelo D que representa a parede de tabique dupla. A deformada para o modelo base é apresentado na figura 6.12 e os modelos afetados apenas pelas condições de fronteira são apresentados na figura 6.13. Nas figuras 6.14 e 6.15 são apresentadas as deformadas para os modelos com as soluções de reforço RA, RAV, RM e RMV, respectivamente.

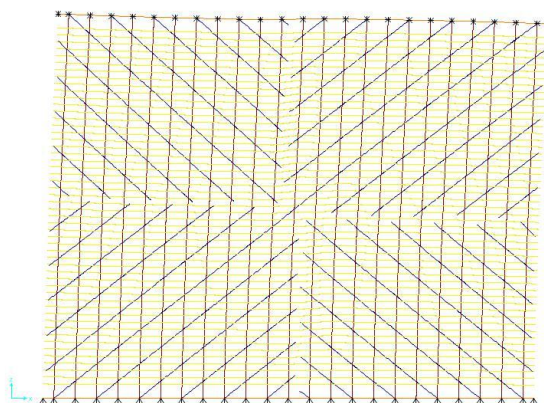


Fig.6.12 – Modelo D-base

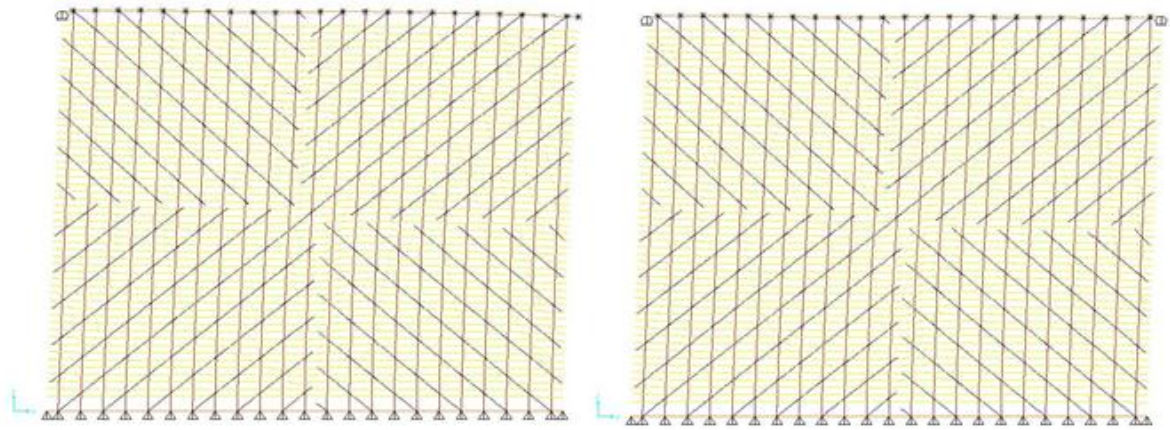


Fig.6.13 – Modelos D-1 e D-2

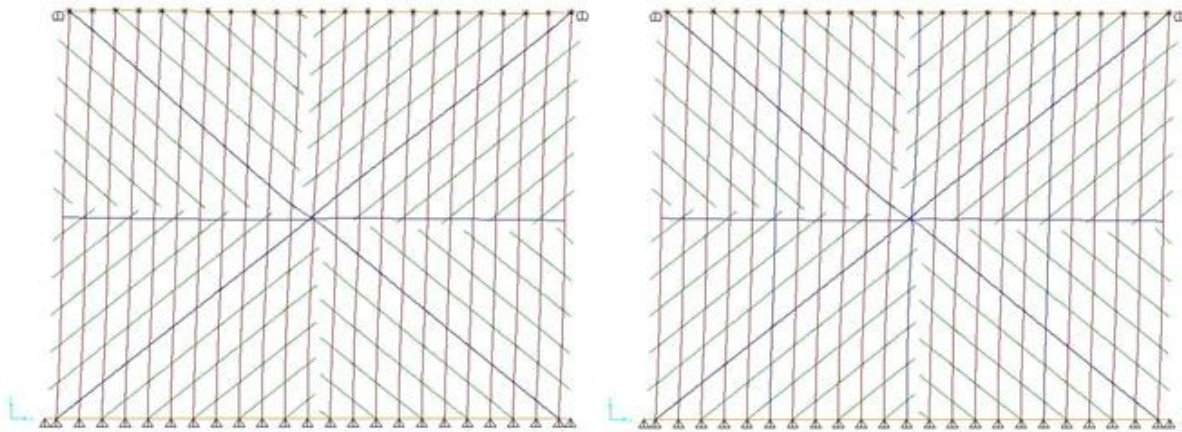


Fig.6.14 – Modelos D-2-RA e D-2-RAV

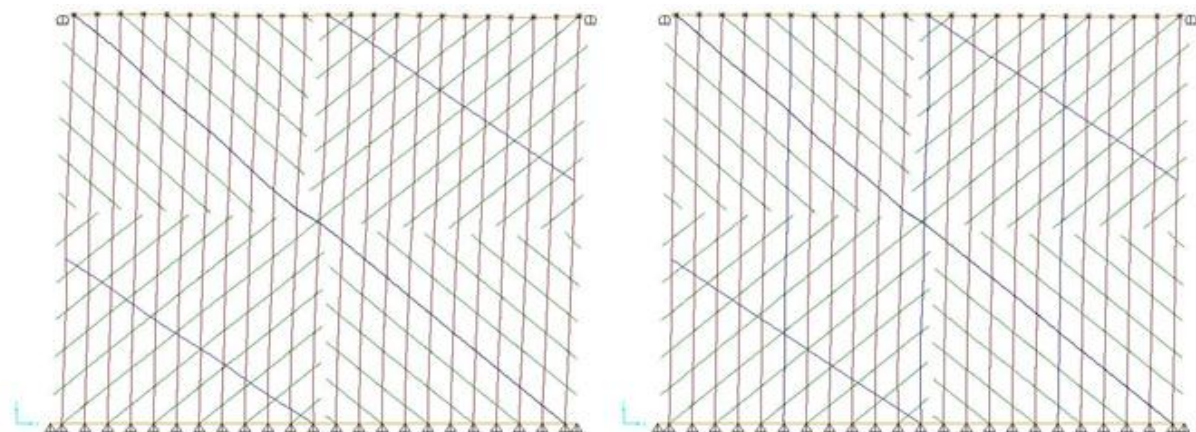


Fig.6.15 – Modelos D-2-RM e D-2-RMV

O valor da rigidez para cada modelo é apresentado na tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Rigidez horizontal - Modelo D

Rigidez (kN/m)	Sem reforço			Com reforço			
				Aço		Madeira	
	D-base	D-1	D-2	D-2-RA	D-2-RAV	D-2-RM	D-2-RMV
	23363,4	26735,4	30751,0	41604,3	42282,6	40310,9	44204,5

Os valores expostos na tabela indicam que, para as soluções que não apresentam qualquer tipo de reforço, a variação do valor da rigidez horizontal é pouco significativa, verificando-se que a fixação de um nó extremo, ou dos dois nós extremos traz, no caso desta parede e quando comparada com as paredes anteriores, benefícios superiores em termos de rigidez horizontal da estrutura. No que diz respeito às soluções reforçadas, verifica-se que, embora provoquem um aumento considerável no valor da rigidez horizontal da parede, em termos percentuais esse incremento é menor do que o obtido para os modelos que representavam as paredes simples. A rigidez associada a esta tipologia de parede é maioritariamente conferida pela disposição das tábuas, em particular pelas tábuas diagonais. A colocação das tábuas na diagonal contribui fortemente para incrementar o valor da rigidez horizontal da parede que, quando comparada com a rigidez associada ao modelo S para os casos não reforçados do modelo base, é, aproximadamente, 23 vezes maior, aumentando de 2242,4%.

6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Numa primeira análise, conclui-se que as soluções reforçadas exibem um aumento importante da rigidez horizontal. Para o modelo S, a aplicação do reforço com aço apresenta os melhores resultados, mostrando-se mais apropriado que a madeira. Relativamente ao modelo SA, constata-se que sobrevaloriza a rigidez da parede de uma forma considerada não realista, não devendo ser utilizado para simular o comportamento no plano de paredes com estas características. Os valores de rigidez associados a este modelo são aproximadamente 4 vezes maiores que os valores obtidos para o modelo S.

No modelo SP verifica-se uma queda do valor da rigidez horizontal, relativamente ao modelo S, pelo facto da parede conter uma abertura. Para este modelo, o aço é o reforço que apresenta melhores resultados.

Finalmente, a parede dupla, tratada no modelo D, apresenta uma rigidez muito superior às restantes sendo que o incremento que ocorre resulta da participação das tábuas diagonais que dotam a parede de uma muito maior rigidez ao corte. Esta análise permite concluir que as paredes duplas, embora apresentando uma menor capacidade resistente às cargas verticais quando comparadas com paredes simples com a mesma espessura, apresentam uma muito maior rigidez horizontal que as dota de uma melhor capacidade de contraventamento estrutural.

7

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No seguimento da revisão bibliográfica efetuada neste trabalho, mostrou-se que em Portugal existe um vasto património construído com elementos de tabique, sendo a sua presença marcada de Norte a Sul. A pesquisa de material relacionada com o tópico referido não foi muito extensa dado que existe pouca informação resultante da falta de estudo dedicado a este tema.

Este trabalho incidiu sobre as paredes de tabique existente nas construções do centro histórico da cidade do Porto devido, por um lado, à proximidade geográfica e, por outro, ao facto de existir nesta cidade uma grande quantidade e diversidade de elementos deste tipo.

Com base no estudo efetuado, conclui-se que as paredes de tabique podem apresentar soluções construtivas distintas. Na casa típica do Porto, constituída por 3 ou mais pisos, as paredes do rés-do-chão e as paredes portantes principais eram construídas em alvenaria de pedra, sendo as paredes divisórias normalmente construídas em tabique. Nalgumas construções, também as paredes exteriores dos pisos superiores apresentavam esta solução construtiva.

Verificou-se que existem fundamentalmente duas tipologias diferenciadas de soluções estruturais de paredes de tabique: as paredes de tábuas simples e as paredes de tábuas duplas.

Foi feita a modelação numérica de paredes de tabique, tendo como objectivo a simulação do seu comportamento estrutural, usando um programa comercial de cálculo automático. Neste estudo foram consideradas as duas tipologias de paredes interiores mais representativas. Os dados recolhidos junto do arquiteto Joaquim Teixeira, e apresentados ao longo desta tese, foram um contributo determinante nesta fase da modelação numérica. Ao contrário do material de enchimento, que não se modelou por opção, a introdução do fasquio e o modo como este liga às tábuas verticais foram aspectos importantes, considerados na modelação numérica. Os casos de carga previstos durante a modelação numérica contemplam ações atuantes no plano da estrutura, a primeira correspondente a uma carga uniformemente distribuída com a direcção e o sentido da gravidade e a segunda a uma acção horizontal, também distribuída com o sentido da esquerda para a direita. Assim, determinou-se a capacidade resistente à compressão através do cálculo da carga crítica à encurvadura, avaliando-se posteriormente a rigidez das paredes quando submetidas a acções horizontais.

Concluiu-se que o ponto fraco deste tipo de paredes é a encurvadura, já que a capacidade resistente à compressão de uma tábua sem encurvadura é muito maior do que o valor da sua carga crítica, p_{cr} .

Assim, partindo das duas tipologias de paredes seleccionadas, foram definidos quatro modelos físicos de paredes de tabique: Modelo S, modelo SA, modelo SP e modelo D. O modelo S e SA representam uma parede de tabique simples, o modelo SP representa uma parede de tabique simples com abertura e o modelo D representa uma parede de tabique dupla. No estudo inicial os modelos foram simulados representando as condições de referência dos modelos físicos, assumindo a designação de modelos

Base. No que toca à configuração da deformada constatou-se que para o modelo S, SA e D todas as tábuas encurvam em torno do seu eixo de menor inércia, no mesmo sentido e ao mesmo tempo. Para modelo SP, modelo com abertura, encurvaram apenas as tábuas localizadas de um dos lados da parede, o lado menos rígido. As respectivas cargas críticas foram $p_{cr}=46,4$ kN/m para os modelo S e SA, $p_{cr}=38,7$ kN/m para o modelo SP e $p_{cr}=7,8$ kN/m para o modelo D. Estes valores permitem concluir que as paredes duplas são bastantes mais instáveis que as paredes constituídas por tábuas simples. Embora o conjunto de tábuas verticais e diagonais totalize a mesma espessura das paredes de tabique simples, verifica-se que as tábuas diagonais têm uma menor contribuição para a resistência à encurvadura.

De forma a verificar até que ponto determinadas anomalias associadas às tábuas verticais que constituem as paredes põem em causa o funcionamento da estrutura, foram considerados também cenários de deterioração, nomeadamente através da redução da rigidez de algumas tábuas. Para estes modelos, as configurações da deformada que se obtêm são iguais aos casos em que as paredes não apresentam qualquer tipo de degradação. Para todos eles, o valor da carga crítica decresce, devido ao facto de existirem zonas de menor rigidez. A diferença verificada nos valores das cargas é mínima, concluindo-se que, mesmo que a parede tenha uma zona com tábuas alteradas nas condições simuladas, isso não altera significativamente o comportamento geral da parede à encurvadura. Para este comportamento contribui, definitivamente, o fasquio que liga as tábuas e obriga a parede a ter uma deformada por encurvadura “homogénea”, atenuando o peso negativo das tábuas danificadas. Conclui-se portanto que a importância e a relevância destas modificações é reduzida, e que não têm praticamente influência no comportamento da parede nas condições analisadas.

Depois de definidos os modelos base e de possíveis cenários de deterioração, foram admitidos cinco novos cenários associados a diferentes condições de fronteira que se podem encontrar, ou introduzir, nestas paredes, podendo algumas delas ser associadas a medidas de reforço estrutural. São simulados cenários de uma possível ligação da extremidade da parede a um ponto mais fixo, nomeadamente uma parede de alvenaria transversal. Existe também uma solução que passa pela introdução de cantoneiras de ligação da parede na base e no topo, restringindo a liberdade de rotação destas fronteiras. Por fim reforça-se o topo esquerdo, numa primeira fase, e os topos esquerdo e direito da parede posteriormente, através da ligação da parede de tabique a outra que lhe é perpendicular.

Analisando os resultados obtidos para cada um dos cenários aplicados aos modelos, conclui-se, fundamentalmente, que a parede com abertura assume um comportamento diferente das restantes. As configurações das deformadas dos modos de encurvadura movimentam apenas as tábuas de um dos lados da abertura, sendo as cargas críticas correspondentes inferiores às dos modelos associados de paredes de tábuas simples sem abertura. Constata-se que os cenários que contribuem mais para a resistência à encurvadura da parede são o reforço de ambos os topos, através da ligação da parede de tabique a outra que lhe é perpendicular, e a introdução de cantoneiras de ligação da parede na base e no topo.

No sentido de prever novas acções que melhorem o desempenho destas paredes são ainda consideradas no âmbito deste trabalho medidas de reforço. É proposto um conjunto de operações destinadas a aumentar a capacidade resistente destas paredes, reforçando-as com a aplicação de dois materiais: aço e madeira. Ambos são aplicados apenas de um dos lados da parede existindo dois cenários de reforço para o aço e outros dois para a madeira. Relativamente ao aço, é proposto um reforço com chapas metálicas em forma de cruz de Santo André (reforço RA) sendo depois completado com a adição de chapas verticais aos quartos do vão dando origem ao reforço RAV. Para a madeira são também contempladas duas acções de reforço, RM e RMV embora a disposição do

reforço seja realizada de outra forma. Estes reforços foram aplicados ao modelo base e associados aos cenários propostos para as condições de fronteira.

Relativamente ao modelo S verifica-se que a aplicação da madeira como medida de reforço se traduz em resultados ligeiramente melhores, quando se compara o efeito da aplicação dos reforços RA e RM. Ainda para este modelo, quando são introduzidas as soluções RAV e RMV constata-se que é para a solução de aço que a capacidade resistente da parede aumenta. Para o modelo SP, a aplicação do aço como medida de reforço traduz-se em incrementos do valor da carga crítica bastante mais significativos. Para a parede de tábuas duplas, representada pelo modelo D, a solução de reforço com madeira, quando comparada com a solução de reforço em aço, apresenta melhorias mais pronunciadas, tanto para o modelo RM como para modelo RMV.

Tanto para os modelos de paredes de tábuas simples e paredes de tábuas duplas, as melhores combinações de soluções surgem quando as soluções de reforço em aço ou em madeira são aplicadas em conjunto com a consideração dos cenários que envolvem a ligação da parede de tabique a outra que lhe é perpendicular em ambos os topos, ou só num, e a aplicação de cantoneiras na base e no topo da parede.

Depois de avaliar a capacidade resistente à compressão através do cálculo da carga crítica, avalia-se a rigidez das paredes quando submetidas a acções horizontais

Verificou-se que, quando a parede de tabique é constituída por tábuas diagonais, o elemento de tabique fica muito mais rígido à distorção no seu plano. Estas tábuas, presentes nas paredes duplas, têm bastante influência na deformabilidade no plano das paredes. Para este tipo de parede, a rigidez ao corte aumenta quando comparada com a de paredes de tabique simples com a mesma espessura total.

Verificou-se também que o fasquio contribui de forma importante para o funcionamento das paredes de tabique, assegurando o funcionamento conjunto das tábuas.

Conclui-se que estes modelos poderão continuar a ser uma ferramenta de trabalho, em trabalhos futuros, devendo ser calibrados com resultados experimentais, que neste momento ainda não existem.

Por fim, propõe-se que se desenvolva futuramente trabalho de investigação no sentido de efectuar:

- Uma caracterização construtiva mais detalhada do tabique;
- A simulação de paredes de tabique onde se inclua a participação do reboco, de modo a melhor estimar o seu comportamento em diferentes cenários de carga;
- A simulação de construções onde se inclua a participação de paredes de tabique de modo a aferir a sua participação no comportamento global das construções;
- Ensaios experimentais com vista a avaliar a qualidade dos resultados obtidos nas simulações apresentadas, quer através de protótipos, quer de estruturas reais.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Minke G. (2006) *Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser – Publishers of Architecture, Basel-Berlin-Boston. ISBN 13- 978-3-7643-7477-8.
- [2] TEIXEIRA, J.J.Lopes. *Descrição do Sistema Construtivo da Casa Burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX*, Porto, 2004.
- [3] Cardoso, R. *Construção de tabique – construção sustentável*. Dissertação de Doutoramento, UTAD, 2013.
- [4] Carvalho, J. *Construções em Tabique na Região de Trás-os-Montes e Alto Douro*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD, 2009.
- [5] Cepeda, A.J.B. *Construções de tabique existentes na associação de municípios do Alto Tâmega*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2009.
- [6] Martinho, J.M.G. *Construção de tabique na associação de municípios da terra fria do Nordeste Transmontano (AMTFNT)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD, 2009/2010.
- [7] Pinto, J., Carvalho, J., Varum, H., Jesus, A., Lousada, J., Morais, J. *Construções em tabique na região de Trás-os-Montes e Alto Douro*.
- [8] Córias, V. *Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos*. Argumentum | GECORPA, Lisboa, 2007.
- [9] Fernandes, F. *Transformação e permanência na habitação portuense. As formas da casa na forma da cidade*. Publicações FAUP, Porto, 1999.
- [10] Guimarães, A., Costa, A., Arêde, A., Carvalho, A., Begonha, A., Medeiros, C., Paupério, E., Barreira, E., Corvacho, H., Sousa, H., Porto, J., Guedes J., Teixeira, J., Faria, J., Quintela, M., Ramos, N., Valentim, N., Póvoas, R., Freitas, V. *Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos*. Ordem dos Engenheiros da Região Norte, Porto, 2012.
- [11] Flórido, F.M.S. *Tipificação de soluções de reabilitação de paredes de madeira em edifícios antigos*. Dissertação de Mestrado em reabilitação do património edificado, FEUP, 2010.
- [12] SAP 2000
- [13] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Flambagem>. 17-06-2013.
- [14] Ferreira, W., Silveira, R., Silva, A., Kamei, C., Neto, A. *Abordagem didáctica do método de Newton-Raphson na estabilidade estrutural*. <http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2009/artigos/705.doc>. 23-04-2013.
- [15] Beer, E., Johnston, B., DeWolf, J. *Resistência dos Materiais*. McGrawHill, São Paulo, 2006.
- [16] Persch, C, Trevisol, D., Christoforo, A.. *Aplicação dos Métodos de Newton no Cálculo da Carga Crítica de Euler em Colunas do Tipo Engastada-Articulada*. http://www.sbmec.org.br/eventos/cnmac/xxxii_cnmac/pdf/592.pdf. 01-05-2013.
- [17] http://www.csiportugal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=164&Itemid=212&lang=pt 01-05-2013
- [18] [http://www.construmatica.com/construpedia/C%C3%A1lculo de Estructuras de Acero: Caso de Esfuerzos Axiales en Columnas](http://www.construmatica.com/construpedia/C%C3%A1lculo%20de%20Estructuras%20de%20Acero:Caso%20de%20Esfuerzos%20Axiales%20en%20Columnas)

[19] NP 4305 (1995) *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas*. Classificação visual. Instituto Português da Qualidade. Portugal.

[20] EN 338 (2003) –structural timber – strength classes. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.